Nicolae Sfetcu

Epistémologie de la gravité expérimentale Rationalité scientifique

Collection ESSAIS

MultiMedia Publishing

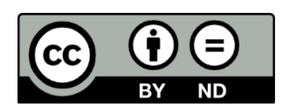
Epistémologie de la gravité expérimentale - Rationalité scientifique

Nicolae Sfetcu

18.03.2020

Sfetcu, Nicolae, « Epistemologia gravitației experimentale – Raționalitatea științifică », SetThings (18 mars 2020), MultiMedia Publishing (ISBN : 978-606-033-351-7), DOI: 10.13140/RG.2.2.22585.31848, URL = https://www.telework.ro/fr/e-books/epistemologie-de-la-gravite-experimentale-rationalite-scientifique/

Email: nicolae@sfetcu.com



Une traduction de
Sfetcu, Nicolae, "Epistemologia gravitației experimentale – Raționalitatea științifică", SetThings (1 august 2019), MultiMedia Publishing (ed.), ISBN: 978-606-033-234-3, DOI: 10.13140/RG.2.2.15421.61925, URL = https://www.telework.ro/ro/e-books/epistemologia-gravitatiei-experimentale-rationalitatea-stiintifica/

Cuprins

INTRODUCTION 4

GRAVITE 5
TESTS GRAVITATIONNELS 6
METHODOLOGIE DE LAKATOS - RATIONALITE SCIENTIFIQUE 11
L'EXTENSION NATURELLE DE LA METHODOLOGIE DE LAKATOS 14
PROGRAMMES BIFURQUES 15
PROGRAMMES UNIFICATEURS 16

1. LA GRAVITE NEWTONIENNE 19

1.1 L'HEURISTIQUE DE LA GRAVITE NEWTONIENNE 26
1.2 PROLIFERATION DES THEORIES POST-NEWTONIENNES 32
1.3 TESTS DES THEORIES POST-NEWTONIENNES 40
1.3.1 TESTS PROPOSES PAR NEWTON 40
1.3.2 TESTS DES THEORIES POST-NEWTONIENNES 44
1.4 ANOMALIES DE LA GRAVITE NEWTONIENNES 45
1.5 POINT DE SATURATION DE LA GRAVITE NEWTONIENNE 46

2. RELATIVITE GENERALE 49

2.1 L'HEURISTIQUE DU PROGRAMME DE LA RELATIVITE GENERALE 61
2.2 PROLIFERATION DES THEORIES POST-EINSTEINIENNES 66
2.3 FORMALISME PARAMETRISE POST-NEWTONIEN (PPN) 70
2.4 TESTS DE LA RELATIVITE GENERALE ET DES THEORIES POST-EINSTEINIENNES 74
2.4.1 TESTS PROPOSES PAR EINSTEIN 81
2.4.2 TESTS DES THEORIES POST-EINSTEINIENNES 83
2.4.3 TESTS CLASSIQUES 87
2.4.4 TESTS MODERNES 90
2.4.5 TESTS EN CHAMP FORT 99
2.4.6 TESTS COSMOLOGIQUES 106

2.5 Les anomalies de la relativite Generale **120**

2.6 Le point de saturation de la relativite generale **121**

3. GRAVITE QUANTIQUE **130**

3.1 L'heuristique de la gravite quantique **143**

3.2 Tests de la gravite quantique **146**

3.3 Gravite quantique canonique **151**

3.3.1 Tests proposes pour le GCC 152

3.3.2. Gravite quantique a boucles 154

3.4 La theorie des cordes **159**

3.4.1 Heuristique de la theorie des cordes 169

3.4.2. Anomalies de la theorie des cordes 172

3.5 Autres theories de la gravite quantique **175**

3.6 Unification (la theorie finale) **176**

4. COSMOLOGIE **181**

CONCLUSIONS **184**

BIBLIOGRAPHIE **192**

Introduction

Dans cet essai, j'aborde l'évolution des tests gravitationnels dans une perspective épistémologique encadré dans le concept de reconstruction rationnelle d'Imre Lakatos, fondée sur sa méthodologie de programmes de recherche. Contrairement à d'autres travaux sur le même sujet, la période évaluée est très longue, allant de la philosophie naturelle de Newton aux théories de la gravité quantique d'aujourd'hui. Afin d'expliquer de manière plus rationnelle l'évolution complexe du concept de gravité du siècle dernier, je propose une extension naturelle de la méthodologie des programmes de recherche que j'utilisais ensuite au cours de la communication. Je pense que cette approche offre une nouvelle perspective sur la manière dont le concept de gravité et les méthodes de test de chaque théorie de la gravité ont évalué dans le temps, par le biais d'observations et d'expériences. Je soutiens, sur la base de la méthodologie des programmes de recherche et des études des scientifiques et des philosophes, que les théories actuelles de la gravité quantique sont dégénératives, en raison du manque de preuves expérimentales sur une longue période et d'auto-immunisation contre la possibilité de la réfutabilité. De plus, un courant méthodologique est en cours de développement, attribuant un rôle secondaire, sans importance, aux vérifications par le biais d'observations et / ou d'expériences. Pour cette raison, il ne sera pas possible d'avoir une théorie complète de la gravité quantique sous sa forme actuelle qui inclura à la limite la relativité générale, car les théories physiques ont toujours été ajustées, au cours de leur évolution, sur la base d'essais d'observation ou expérimentaux, et vérifiées par les prédictions effectuées. En outre, contrairement à une opinion répandue et aux programmes en cours concernant l'unification de toutes les forces fondamentales de la physique dans une théorie finale unique, basée sur la théorie des cordes, je soutiens que cette unification est généralement improbable et, de toute façon, impossible pour que l'unification soit développée sur la base des théories actuelles de la gravité quantique, y compris la théorie des cordes. En outre, je partage l’avis de certains scientifiques et philosophes selon lequel on consacre actuellement trop de ressources à l’idée de développer des théories de la gravité quantique, et en particulier de la théorie des cordes, qui devrait inclure la relativité générale et unifier la gravité avec d’autres forces, en particulier conditions dans lesquelles la science n’impose pas de tels programmes de recherche.

Dans l'*Introduction*, après une très brève histoire du concept de gravité de l'Antiquité au 17ème siècle, je présente différentes approches dans le temps des méthodologies d'essais

gravitationnels et du concept de rationalité scientifique de Lakatos à travers des programmes de recherche. Je présente ma proposition d'extension de la méthodologie de Lakatos avec deux nouveaux termes, programmes bifurqués et programmes unificateurs, avec leurs caractéristiques spécifiques. Dans *La gravité newtonienne*, après une analyse de la méthodologie utilisée par Newton, je parle des heuristiques négatives (noyau dur) et des heuristiques positives (stratégie de développement) utilisées dans l'élaboration de la loi de la gravité universelle. Il s'ensuit une période de prolifération des théories de la gravité post-newtoniennes, les tests proposés par Newton et ceux des autres théories, puis la mise en évidence des anomalies accumulées par la théorie et le point de saturation, où l'on ressent le besoin de développer une autre théorie plus puissante et plus heuristique pour digérer les anomalies de la théorie de Newton. La section relative à *La relativité générale* est abordée de la même manière, en partant d'une approche épistémologique et méthodologique, des heuristiques négatives et positives de ce programme de recherche, de la prolifération des théories post-einsteiniennes et de la description du formalisme post-newtonien paramétré utilisé pour analyser, évaluer et comparer les modèles de gravité basée sur les tests de gravité spécifiques à ces théories. La dernière partie de la section est consacrée aux anomalies apparaissant dans la relativité générale et à mettre en évidence le point de saturation qui nécessite une nouvelle approche de la gravité. Les mêmes problèmes épistémologiques et méthodologiques sont abordés dans *La gravitation quantique*, avec un accent mis sur la gravitation quantique canonique (y compris la gravitation quantique à boucles) et la théorie des cordes, en soulignant les problèmes méthodologiques de ces théories et les tests proposés pour leur vérification expérimentale. Je termine la section par l'évaluation des tentatives pour obtenir l'unification de toutes les forces dans une théorie finale. Il suit une section plus courte sur *La cosmologie*, dans laquelle j'analyse le programme de recherche de la cosmologie du point de vue des théories de la gravité. Dans les *Conclusions* que je présente, je résume mes opinions et arguments développés tout au long de l'essai.

Gravité

La gravité a un caractère universel, mais son pouvoir décroît rapidement avec la distance, constituant la plus faible des quatre forces fondamentales de la physique. [1] Au 4ème siècle avant

---

[1] Les quatre forces « fondamentales » sont la force électromagnétique, la force nucléaire «faible» responsable de la désintégration radioactive, la force nucléaire «forte» reliant les éléments constitutifs des noyaux, et la force gravitationnel.

JC, le philosophe grec Aristote considérait comme la cause de la chute des corps lourds la tendance à se déplacer vers leur lieu naturel. [2] Dans le Livre VII de *De Architectura*, l'ingénieur et architecte romain Vitruve soutient que la gravité ne dépend pas du « poids » d'une substance, mais plutôt de sa « nature ». [3] L'astronome et mathématicien indien Brahmagupta a soutenu que la Terre est sphérique et attire les objets. [4] Au dix-septième siècle, Galilée découvrit que, contrairement aux enseignements d'Aristote, tous les objets accéléraient de manière égale lorsqu'ils tombaient. [5] Après la description de Newton de la gravité en tant que force, la relativité générale considère que la gravité est une conséquence de la courbure de l'espace-temps due à la distribution de masse. Selon la théorie principale actuelle, la gravité est apparue avec la naissance de l'Univers, à l'époque de Planck (10^{-43} secondes après le Big Bang). Actuellement, une théorie quantique est en cours de développement qui tente d'unifier la gravité avec les trois autres forces fondamentales de la nature. La mécanique quantique avec la théorie quantique des champs[6] et la relativité générale sont les théories fondamentales dans lesquelles la gravité est abordée.

Tests gravitationnels

Allan Franklin et Slobodan Perovic, dans *Experiment in Physics*, [7] expliquent que les théories scientifiques en général, en physique en particulier, sont confirmées (temporairement) par des expériences vérifiant les affirmations et les prédictions des théories, jetant ainsi les bases de la connaissance scientifique. Francis Bacon a été le premier à soutenir le concept d'une expérience cruciale, qui peut décider la validité d'une hypothèse ou d'une théorie. Plus tard, Newton a soutenu

---

[2] Edward Grant, *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages: Their Religious, Institutional and Intellectual Contexts* (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1996), 60-61.

[3] Vitruvius Pollio, *De architectura* (Torino: Giulio Einaudi, 1997), 215.

[4] Muḥammad ibn Aḥmad Bīrūnī, « Alberuni's India », text, 1910, 272, http://www.columbia.edu/cu/lweb/digital/collections/cul/texts/ldpd_5949073_001/index.html.

[5] Stillman Drake, *Galileo at Work: His Scientific Biography* (Courier Corporation, 2003).

[6] La théorie quantique des champs est le cadre commun de la théorie de la lumière et des électrons sous la forme de champs (électrodynamique quantique), de la théorie des forces nucléaires faibles et de la théorie des quarks et des gluons. Le modèle standard de la physique des particules combine ces approches et décrit la structure interne des atomes à travers des champs quantiques.

[7] Allan Franklin et Slobodan Perovic, « Experiment in Physics », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Winter 2016 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016), https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/physics-experiment/.

que les théories scientifiques sont directement induites par les résultats expérimentaux et les observations, excluant les hypothèses non vérifiées. Hobbes a déclaré au contraire que la raison humaine a été antérieure aux techniques expérimentales, critiquant l'optimisme de Boyle quant au rôle de la méthode expérimentale. [8] Au 20ème siècle, le positivisme logique sépare les déductions observationnelles des déductions théoriques. Thomas Kuhn et Paul Feyerabend ont critiqué ce point de vue, affirmant que toutes les expériences sont basées sur un cadre théorique et ne peuvent donc pas, de manière indépendante, confirmer une théorie. Ian Hacking a approuvé cette idée, mais a déclaré que les commentaires restent fiables grâce à des confirmations indépendantes. [9] Dans le cas d'un système expérimental unique viable, Allan Franklin et Slobodan Perovic proposent des stratégies spécifiques pour valider l'observation, qui constituent, avec la stratégie de Hacking, une épistémologie de l'expérience:

1. Vérification et calibration expérimentale, à l'aide des phénomènes connus.
2. Reproduction d'artefacts précédemment connus.
3. Élimination des sources d'erreur plausibles et explications alternatives du résultat (« stratégie de Sherlock Holmes »).
4. Utilisation des résultats pour argumenter leur validité.
5. Utilisation d'une théorie des phénomènes indépendante bien corroborée pour expliquer les résultats.
6. Utilisation d'un appareil basé sur une théorie bien corroborée.
7. Utilisation d'arguments statistiques. [10]

Mais appliquer ces stratégies ne garantit pas l'exactitude des résultats. Pour cette raison, les physiciens utilisent plusieurs stratégies, en fonction de l'expérience.

Peter Galison, dans *How Experiments End* (1987), affirme que les expériences se terminent de manière subjective, lorsque les experts estiment qu'elles ont atteint un résultat valable. [11] La plupart des expériences sont basées sur les traditions sur le terrain et sur l'expérience personnelle du chercheur (y compris ses hypothèses théoriques), à la fois dans la conception de l'expérience et

[8] Steven Shapin et Simon Schaffer, *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life* (Princeton University Press, 1989).

[9] Ian Hacking, « Do We See Through a Microscope? », *Pacific Philosophical Quarterly* 62, nº 4 (1981): 63: 305–322.

[10] Franklin et Perovic, « Experiment in Physics ».

[11] Peter Galison, « How Experiments End », *Journal of Philosophy* 87, nº 2 (1990): 235.

dans l'acceptation d'une théorie qui « permet » la conduite des expériences. Les hypothèses théoriques des expérimentateurs sont acceptées.

Harry Collins a développé un argument appelé « régression d'expérimentateur », [12] selon lequel il n'existe aucun critère formel possible à appliquer pour décider si un dispositif expérimental fonctionne correctement ou non. Ce qui compte vraiment, c'est la négociation au sein de la communauté scientifique, qui dépend de « facteurs tels que la carrière, les intérêts sociaux et cognitifs des scientifiques et l'utilité perçue pour les travaux futurs, mais ne sont pas déterminés par ce que nous pourrions appeler des critères épistémologiques ou un jugement rationalisé. » [13]

Pickering soutient également que les raisons d'accepter les résultats sont leur utilité ultérieure dans la pratique scientifique et leur accord avec les engagements communautaires existants. [14] Il affirme qu'un système expérimental produit rarement des résultats expérimentaux valables s'il n'est pas ajusté en conséquence, et que la théorie de l'appareil ainsi que la théorie des phénomènes déterminent la production d'un résultat expérimental valide. [15] Plus tard, il conclut que « les résultats dépendent de la façon dont le monde est » : [16] « Ainsi, la manière dont le monde matériel s'infiltre et infecte nos représentations de manière non triviale et cohérente. Mon analyse montre donc un engagement intime et réactif entre la connaissance scientifique et le monde matériel, qui fait partie intégrante de la pratique scientifique.» [17]

Hacking prétend que, malgré les apparences, les constructivistes, tels que Collins, Pickering ou Latour, ne croient pas que les faits n'existent pas ou qu'il n'y a pas de réalité. Il cite Latour et

---

[12] Harry M. Collins, *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*, Reprint edition (Chicago: University of Chicago Press, 1992), 79-111.

[13] Franklin et Perovic, « Experiment in Physics ».

[14] Andrew Pickering, « The Hunting of the Quark », *Isis* 72, nº 2 (1981): 216-36.

[15] Pickering, « The Hunting of the Quark ».

[16] Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, 1 edition (Chicago: University of Chicago Press, 1995), 182.

[17] Pickering, 183.

Woolgar que le résultat est une conséquence du travail scientifique plutôt que sa cause, [18] [19] dans un consensus relatif avec la communauté scientifique.

L'accumulation d'une grande quantité de données dans une expérience peut nécessiter une sélection, par la technique de réduction utilisée par les physiciens, des données qui seront utilisées. Cela peut constituer une préoccupation épistémologique importante en ce qui concerne la sélection des données jugées utiles, minimisant ainsi la probabilité d'obtenir des résultats inexplorés. [20] Dans de tels cas, les physiciens appliquent une analyse de robustesse pour tester les hypothèses, vérifier le matériel utilisé et établir des algorithmes de travail.

Dans le cas des solutions des équations d'Einstein de la relativité générale et de la modélisation des théories de la gravité quantique, en raison de la complexité de ces approches, des simulations d'expériences sur ordinateur sont tentées. Il existe actuellement un différend quant à la mesure dans laquelle ces simulations sont des expériences, des théories ou des méthodes hybrides de recherche scientifique. [21]

Entre 1965 et 1990, de nombreuses expériences ont été développées pour tester des théories gravitationnelles, notamment : [22]

- Mesures de haute précision des effets de la radiation électromagnétique dans le champ gravitationnel, confirmant la relativité générale (RG) pour le champ gravitationnel faible.
- Détection de l'interaction gravitationnelle non linéaire des masses à un pulsar dans le champ gravitationnel d'une étoile à neutrons.
- Confirmation indirecte de la radiation gravitationnel en observant deux étoiles à neutrons proches confirmant la RG.

---

[18] Bruno Latour, Steve Woolgar, et Jonas Salk, *Laboratory Life: The Construction of Scientific Facts, 2nd Edition*, 2nd edition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 1986), 180.

[19] Ian Hacking, *The Social Construction of What?*, Revised edition (Cambridge, Mass: Harvard University Press, 2000), 80-81.

[20] Allan Franklin, *Shifting Standards: Experiments in Particle Physics in the Twentieth Century*, 1 edition (Pittsburgh, Pa: University of Pittsburgh Press, 2013), 224-25.

[21] Eric Winsberg, *Science in the Age of Computer Simulation* (Chicago: University of Chicago Press, 2010), 136.

[22] Vladimir B. Braginsky, « Experimental Gravitation (What Is Possible and What Is Interesting to Measure) », *Classical and Quantum Gravity* 11, nº 6A (juin 1994): A1–A7, https://doi.org/10.1088/0264-9381/11/6A/001.

- Les tentatives, échoués jusqu'à présent, pour constater la violation du principe d'équivalence ou l'existence d'une cinquième force.

Au cours de cette période, la plupart des expériences ont confirmé la relativité générale à l'aide des technologies nouvellement développées. Une base technologique a été créée pour l'astronomie des ondes gravitationnelles. Des antennes barogéniques cryogéniques et des antennes interférométriques laser ont été construites, associées à l'analyse théorique des expériences sur les masses d'essai, en resultant que la sensibilité des expériences dépend de l'isolation thermique, si l'appareil enregistre en continu les coordonnées la sensibilité de l'antenne est limitée, et la sensibilité peut être augmentée s'ils sont utilisés des procédures quantiques. [23] Les antennes peuvent aider à observer la radiation de fond gravitationnel et à tester la relativité générale dans le cas ultra-non linéaire.

En ce qui concerne la sensibilité des appareils de mesure gravitationnelle, Vladimir B Braginsky indique que le niveau actuel des connaissances nous permet d'espérer que la sensibilité des antennes puisse augmenter et qu'aucune limite de sensibilité n'a été fixée dans les expériences gravitationnelles, cela dépend des connaissances des scientifiques. [24]

Actuellement, la gravité expérimentale est un domaine émergent, caractérisé par des efforts continus pour tester les prédictions des théories de la gravité.

La *limite classique* ou la *limite de correspondance* est la capacité d'une théorie physique à se rapprocher de la version classique lorsqu'elle est prise en compte par les valeurs spéciales de ses paramètres. [25] Le *principe de correspondance* formulé par Niels Bohr en 1920[26] stipule que le comportement des systèmes décrits par la mécanique quantique reproduit la physique classique dans les limites de grands nombres quantiques. [27] Ce principe a deux exigences fondamentales: la reproduction des crochets de Poisson et la spécification d'un ensemble complet d'observables

---

[23] Braginsky.

[24] Braginsky.

[25] David Bohm, *Quantum Theory*, Revised ed. edition (New York: Dover Publications, 1989).

[26] N. Bohr, « Über die Serienspektra der Elemente », *Zeitschrift für Physik* 2, nº 5 (1 octobre 1920): 423–478, https://doi.org/10.1007/BF01329978.

[27] Paul A. Tipler et Ralph Llewellyn, *Modern Physics*, Sixth edition (New York: W. H. Freeman, 2012), 160-61.

classiques dont les opérateurs, agissant dans des états semi-classiques appropriés, reproduisent les mêmes variables classiques avec de petites corrections quantiques. [28]

Méthodologie de Lakatos - Rationalité scientifique

La relativité générale et la mécanique quantique sont des *paradigmes au sens de Kuhn*. [29] Les deux coexistent simultanément. Mais dans le schéma de Kuhn, il n'existe aucune situation dans laquelle deux paradigmes simultanés coexistent pacifiquement. Le paradigme de Kuhn est défini principalement d'un point de vue sociologique. [30] En ce sens, la « famille » des relativistes coexiste pacifiquement et simultanément avec la « famille » des théoriciens de la physique quantique, pendant près de cent ans, sans grande interaction entre eux. Dans les universités, les deux paradigmes sont enseignés. En outre, les deux paradigmes ont une caractéristique commune : la revendication de la totalité, l'universalité. Les théoriciens quantiques considèrent que le rôle de l'observateur et l'interprétation statistique correspondante ne sont correctement décrits que dans la théorie quantique. En même temps, les partisans de la théorie (métrique) de la relativité générale considèrent que l'interaction gravitationnelle est universelle et doit être représentée par espace-temps géométrique incurvé, qui influence à son tour la gravité.

Les deux paradigmes ci-dessus sont essentiellement incompatibles du point de vue du système d'observation. [31] Malgré l'incompatibilité, les deux paradigmes sont traditionnellement appliqués dans différents domaines, à savoir la macrophysique et la microphysique. Les deux paradigmes ne présentent pas d'anomalies décisives et sont extrêmement efficaces et respectés. En outre, il n'y a pas de concurrence entre les deux paradigmes. Il s'avère que *cette situation actuelle en physique n'est pas compatible avec le schéma de Kuhn pour la structure des révolutions scientifiques*.

Lakatos a proposé une méthodologie pour étudier l'évolution de la science par le biais de programmes de recherche, une combinaison de la falsifiabilité de Popper, des révolutions scientifiques de Kuhn et de la tolérance méthodologique de Feyerabend. [32] Le concept de Lakatos prend en compte un certain nombre de théories incluses dans un programme de recherche, dans lequel chaque nouvelle théorie découle de l'ajout de clauses auxiliaires (ou de réinterprétations

---

[28] Abhay Ashtekar, Luca Bombelli, et Alejandro Corichi, « Semiclassical States for Constrained Systems », *Physical Review D*, 2005, https://www.academia.edu/587754/Semiclassical_states_for_constrained_systems.

[29] Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, 3rd edition (Chicago, IL: University of Chicago Press, 1996).

[30] Kuhn, 10.

[31] Jürgen Audretsch, « Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions », *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, nº 2 (1 septembre 1981): 322-39, https://doi.org/10.1007/BF01801202.

[32] Imre Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers* (Cambridge University Press, 1980).

sémantiques) des théories existantes pour expliquer certaines anomalies. Une telle nouvelle théorie est théoriquement progressive si elle a un contenu empirique excessif par rapport aux théories existantes (si elle prédit un fait nouveau), et est empiriquement progressive si certaines de ces prédictions sont confirmées (elle produit de nouveaux faits). Une nouvelle théorie est progressive à la fois théorique et empirique, autrement dégénéré. Il est considéré « scientifique » s'il est au moins théoriquement progressif. Une théorie de la série est « falsifiée » lorsqu'elle est remplacée par une théorie au contenu plus corroboré.

Il n'y a pas de limite de temps pour l'évaluation finale d'un programme ; Pour lui, ni les « réfutations » de Popper ni les « crises » de Kuhn ne sont pas applicables. Un nouveau programme de recherche (un nouveau concept scientifique, par exemple) bénéficie d'une certaine tolérance méthodologique. Les expériences « cruciales » ne peuvent être considérées comme décisives « qu'après une longue rétrospective » : « La découverte d'une incohérence - ou d'une anomalie - ne devrait pas arrêter immédiatement le développement d'un programme : il peut être rationnel de mettre l'incohérence dans une certaine mise en quarantaine, et continuer avec l'heuristique positive du programme. » Ainsi, les ellipses de Kepler ont été reconnues comme une preuve cruciale pour Newton et contre Descartes cent ans après le *Principia* de Newton. [33] Et le comportement anormal du périhélie de Mercure est connu depuis des décennies comme une anomalie dans le programme de Newton, mais seule l'élaboration de la théorie d'Einstein en a fait une « réfutation » du programme de recherche de Newton.

Pour Lakatos, l'histoire de la science est une histoire des programmes de recherche concurrents (« paradigmes »), mais n'inclut pas nécessairement les périodes kuhniennes de science normale, permettant ainsi la coexistence simultanée de théories concurrentes même si la nouvelle théorie a, pendant une période pouvant durer des décennies, un pouvoir heuristique inférieur.

L'heuristique est un concept central de la philosophie de Lakatos. Il nous indique les voies de recherche à éviter (heuristiques négatives) et les voies à suivre (heuristiques positives), en définissant le « cadre conceptuel » (et, par conséquent, le langage). L'heuristique négative nous interdit de nous diriger *modus tollens* vers le « noyau dur » du programme. À l'aide d'heuristiques positives, on peut articuler ou même inventer des « hypothèses auxiliaires » qui forment une ceinture de protection autour de ce noyau, qui doivent résister aux tests et qui doivent être ajustées et même remplacées pour défendre le noyau.

Alors que les progrès théoriques (tels que décrits par Lakatos) peuvent être immédiats, les progrès empiriques peuvent ne pas être vérifiés longtemps, et une longue série de « réfutations » peut survenir dans un programme de recherche avant que les hypothèses auxiliaires croissants, avec un contenu approprié, ou la revue des faux « faits », faire du programme une réussite. L'heuristique

[33] Isaac Newton, « Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed. », The British Library, 1687, https://www.bl.uk/collection-items/newtons-principia-mathematica.

positive ignore les exemples réels, les données « disponibles », étant basée sur les « modèles » prédéterminés des chercheurs du programme de recherche, qui peuvent être modifiés et même remplacés lors de la poursuite du développement du programme. Dans cette évolution, les « réfutations » n'ont aucune pertinence, elles sont prévisibles et surmontées par la stratégie de recherche.

Selon Lakatos, « Cette méthodologie offre une reconstruction rationnelle de la science. Le mieux est de la présenter en contraste avec la falsifiabilité et le conventionnalisme. » [34] L'histoire des sciences est l'histoire des programmes de recherche plutôt que des théories, ce qui justifie en partie l'idée que l'histoire des sciences est l'histoire des cadres conceptuels ou du langage scientifique. « Un programme avance théoriquement si la nouvelle théorie résout l'anomalie et est vérifiable indépendamment en faisant de nouvelles prédictions, et il avance empiriquement si au moins une de ces nouvelles prédictions est confirmée. Un programme peut progresser, à la fois théoriquement et empiriquement, même si toutes les théories qu'il produit sont rejetées. Un programme dégénère si ses théories successives ne sont pas théoriquement progressives (car elles ne prédisent pas de nouveaux faits) ou empiriquement (car les nouvelles prédictions sont réfutées) ». [35]

Les modèles dans les programmes de recherche sont des ensembles de conditions idéalisées mais de plus en plus proches de la réalité, et éventuellement des théories observationnelles, utilisées au cours du programme pour contribuer à son développement. Les réfutations de ces modèles sont prévues dans la stratégie de développement (heuristiques positives), sont non pertinentes et « digérées » par le modèle suivant. Ainsi, « les difficultés d'un programme sont plutôt d'ordre mathématique qu'empirique ». Les réfutations des modèles sont plutôt des vérifications (corroborations) de l'approximation du modèle de réalité, de son pouvoir heuristique. Selon la méthodologie, les premiers modèles sont tellement idéalisés qu'ils ne correspondent peut-être pas du tout à la réalité.

Selon Barry Gholson et Peter Barker, la méthodologie de Lakatos suggère que les programmes de recherche évoluent d'un état initial qui ressemble à l'instrumentalisme à un état mature qui ressemble au réalisme. Dans le programme de recherche de Newton, Lakatos indique notamment que la première théorie d'un programme peut être tellement idéalisée qu'elle ne représente rien (le signe distinctif de l'instrumentalisme). [36] Le remplacement de la théorie par de nouvelles théories successives au fur et à mesure de l'avancement du programme transforme le modèle initial en un candidat de plus en plus plausible à la réalité. Une partie importante du programme heuristique consiste en des recommandations pour l'incorporation de nouvelles caractéristiques, absentes dans

---

[34] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 110.

[35] Nicolae Sfetcu, « Reconstructia Rationala a Stiintei Prin Programe de Cercetare » (2019), http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24667.21288.

[36] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 50-51.

la théorie initiale, mais nécessaires pour les représentations dans le monde réel. Ainsi, les caractéristiques instrumentales et réalistes du programme de recherche Lakatos sont incompatibles avec les catégories mutuellement exclusives présentées par les empiristes logiques. [37]

Lakatos décrit un programme de recherche comme suit :

> « Il consiste en une série de théories en développement. De plus, cette série a une structure. Il a un noyau dur, tel que les trois lois du mouvement et la loi de la gravité dans le programme de recherche de Newton, et possède une heuristique, qui inclut un ensemble de techniques de résolution des problèmes. (...) Enfin, un programme de recherche comporte une large ceinture d'hypothèses auxiliaires à partir desquelles nous établissons les conditions initiales. (...) J'appelle cette ceinture une ceinture de protection car elle protège le noyau dur des réfutations : les anomalies ne sont pas considérées comme des réfutations du noyau dur, mais des hypothèses de la ceinture de protection. (...) la ceinture de protection est constamment modifiée, élargie ou compliquée, tandis que le noyau dur reste intact. » [38]

L'extension naturelle de la méthodologie de Lakatos

Les programmes de recherche permettent de développer des théories plus complexes. Barry Gholson et Peter Barker estiment que les termes peuvent être appliqués aux théories individuelles et aux programmes. [39] Si cela s'applique aux théories d'un programme de recherche, j'estime qu'elles deviennent à leur tour des programmes de recherche, que l'on peut appeler des *sous-programmes de recherche*.

Contrairement aux révolutions scientifiques de Kuhn, Lakatos a supposé que l'existence simultanée de plusieurs programmes de recherche fût la norme. La science est actuellement confrontée à une situation aussi inhabituelle : deux théories incompatibles, mais toutes deux acceptées par la communauté scientifique, décrivent la même réalité de deux manières différentes. La mécanique quantique régit les phénomènes de petites dimensions de la physique des particules élémentaires, à des vitesses bien inférieures à la vitesse de la lumière et des énergies élevées, et la relativité générale traite le macro-univers, à des vitesses proches de la vitesse de la lumière et des petites énergies. Ainsi, un problème de sous-détermination en physique s'est posé. La gravitation quantique tente de compléter la révolution scientifique en physique amorcée au XIXe siècle, en vue de l'unification de toutes les forces fondamentales, en fusionnant les deux cadres de la physique quantique et de la relativité générale. Les efforts des physiciens dans cette tentative ont abouti à une grande variété d'approches, de techniques et de théories, dont les plus connues sont la théorie

---

[37] Barry Gholson et Peter Barker, « Kuhn, Lakatos, and Laudan: Applications in the history of physics and psychology », *American Psychologist* 40, nº 7 (1985): 755-69, https://doi.org/10.1037/0003-066X.40.7.755.

[38] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 179.

[39] Gholson et Barker, « Kuhn, Lakatos, and Laudan ».

des cordes et la gravité quantique à boucles. Mais l'évolution dans cette direction est très lente et semée d'incertitudes et de conflits.

Le problème de la sous-détermination implique que plus d'une théorie est compatible avec des données empiriques. La sous-détermination peut être relative aux données actuellement disponibles (transitoire ou sous-détermination scientifique), auquel cas les théories peuvent différer en termes de prédictions non vérifiées, ou de sous-détermination entre théories ou formulations théoriques concernant toutes les données possibles (une « sous-détermination permanente »), quand toutes leurs prédictions sont identiques. Une sous-détermination permanente disparaît (sans signification réelle) dans le cas de l'approche instrumentiste si les théories ne sont individualisées que par leur contenu empirique. [40] Mais si nous supposons que les formulations des théories alternatives décrivent différents scénarios, la sous-détermination doit être considérée comme réelle.

Quine affirme que deux théories logiquement incompatibles peuvent être à la fois compatibles avec les données[41] mais que, s'il existe une correspondance entre les formulations théoriques, elles ne décrivent pas en fait des théories différentes, ce sont des variantes différentes de la même théorie (« reconstruction des prédicats »). Matsubara affirme que les formulations peuvent représenter deux théories alternatives vraies malgré la similitude structurelle, car il existe des différences sémantiques pertinentes qui sont perdues dans la cartographie de la théorie formalisée de manière logique ou mathématique. [42]

Les programmes de recherche peuvent en même temps concurrencer des théories uniques, des théories uniques entre eux ou des programmes de recherche entre eux. On peut parler d'une « **unité de recherche** » en tant que théorie singulière ou d'un programme de recherche.

Programmes bifurqués

Barry Gholson et Peter Barker déclarent que la méthodologie de base de Lakatos n'est pas un moyen efficace de « représenter la métaphysique sous-jacente identifiée par les kuhniens et les popperiens » [43] en raison de l'existence simultanée de plusieurs théories de type Lakatos qui illustrent le même ensemble d'engagements fondamentaux. Selon eux, le programme de recherche consiste en une série de théories successives qui forment des chaînes, mais jamais de groupes ou de familles de théories liées pouvant être en concurrence.

---

[40] Keizo Matsubara, « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities », *Synthese* 190, nº 3 (2013): 471–489.

[41] Willard V. Quine, « On Empirically Equivalent Systems of the World », *Erkenntnis* 9, nº 3 (1975): 313–28.

[42] Matsubara, « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ».

[43] Gholson et Barker, « Kuhn, Lakatos, and Laudan ».

À mon avis, c'est une fausse déclaration. Lakatos n'a jamais nié de telles séquences. De plus, on peut être développé naturellement dans la méthodologie de Lakatos une telle théorie des groupes, appelée par eux « clusters ». Plus tard, Laudan a développé cette idée d'une série de chaînes théoriques incluses dans une seule entité historique déterminée par la dominance d'un certain ensemble d'engagements métaphysiques.[44] Dans certains cas, des théories contradictoires peuvent être développées sur la base des mêmes engagements fondamentaux.

La méthodologie de Lakatos n'exclut pas ces situations, mais elles peuvent résulter d'une manière très naturelle si l'on considère que ces théories partent du même noyau dur (des mêmes heuristiques négatives) mais utilisent une stratégie de développement différente (des heuristiques positives). J'appelle ces théories « **bifurcations** », respectivement **théories bifurquées** ou même **programmes bifurqués** dans une approche à long terme.

Lakatos lui-même note qu'un programme de recherche peut être bifurqué à un moment donné :

> « Mais nous ne devons pas oublier que deux théories spécifiques, bien que mathématiquement (et observationnelles) équivalentes, pourraient être incorporées dans différents programmes de recherche rivaux et que le pouvoir heuristique positif de ces programmes pourrait être différent... (un bon exemple est la preuve d'équivalence entre l'approche de Schrödinger et celle de Heisenberg en matière de physique quantique). »[45]

Programmes unificateurs

Immédiatement après 1900, la quantification de Planck remettait en question toute la physique classique. Jusque-là, la physique s'était développée en appliquant, en élargissant, en modifiant ou en réinterprétant les théories physiques établies existantes, dans une chaîne unidimensionnelle. Mais la physique - en particulier la mécanique newtonienne et l'électrodynamique Maxwell-Lorentz - n'était plus valide selon les résultats de Planck. Une nouvelle théorie était nécessaire, mais cela ne pouvait plus être obtenu par l'extension ou la modification des théories physiques existantes, car elles semblaient fondamentalement fausses. Ainsi, Einstein a été obligé d'inventer une nouvelle théorie fondamentale, essayant d'unifier les théories actuelles. C'est ainsi que la relativité restreinte est apparue, par nécessité.

---

[44] L. Laudan, *Progress and its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth* (University of California Press, 1977).

[45] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 33-34.

Par la suite, l'unification de toutes les forces, par une approche quantique de la relativité générale, est devenue la principale préoccupation de la gravité quantique. [46] Il existe des précédents à cet égard: de la théorie électromagnétique classique et la mécanique classique, deux nouvelles théories unificateures indépendantes ont émergé, la relativité restreinte et la mécanique quantique; de la relativité restreinte et la mécanique quantique, a résulté la théorie quantique des champs; et à l'heure actuelle, on espère parvenir à une nouvelle théorie unificateure, à partir de la relativité générale (une généralisation de la relativité restreinte) et de la théorie quantique des champs. Ces théories unificateures combinent les théories à partir desquelles elles se sont formées dans un nouveau cadre commun.

Dans la méthodologie de Lakatos, à propos de ces théories unificateures, on peut affirmer qu'elles appartiennent à un nouveau programme de recherche avec des heuristiques négatives et positives différentes de celles des **programmes de recherche unifiés**, mais que la théorie correspondante est réduite aux théories unifiées sous certaines conditions. J'appelle un tel programme un « **programme unificateur** » (« **unificateur** ») résulté du concept d'unification.

Pour être accepté, un programme unificateur doit avoir une plus grande puissance heuristique (théorique ou expérimentale) que ses programmes composants.

Ainsi, par la théorie des cordes, on tente d'unifier la théorie générale de la relativité d'Einstein avec la mécanique quantique, de manière à maintenir le lien explicite avec la théorie quantique et la description à énergie réduite de l'espace-temps dans la relativité générale. Aux basses énergies, il donne naturellement naissance à la relativité générale, aux théories de jauge, aux champs scalaires et aux fermions chiraux. La théorie des cordes intègre plusieurs idées qui ne disposent pas encore de preuves expérimentales, mais qui permettraient à la théorie d'être considérée comme un candidat unificateur pour la physique au-delà du modèle standard. [47]

Matsubara apprécie la méthodologie de Lakatos dans l'interprétation d'Hacking, mais il note également le manque de fusion des différents programmes de recherche dans la méthodologie de Lakatos, donnant comme exemples de théories unifiées la mécanique ondulante de Schrodinger et la mécanique matricielle de Heisenberg. [48] Il envisage également la possibilité d'une fusion des

---

[46] Claus Kiefer, « Quantum Gravity — A Short Overview », in *Quantum Gravity: Mathematical Models and Experimental Bounds*, éd. par Bertfried Fauser, Jürgen Tolksdorf, et Eberhard Zeidler (Basel: Birkhäuser Basel, 2007), 2, https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7978-0_1.

[47] David Tong, *String Theory* (University of Cambridge, 2009), http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf.

[48] Keizo Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research* (Filosofiska Institutionen, Uppsala universitet, 2012).

idées issues de la théorie des cordes et de certains de ses concurrents, telles que la gravitation quantique à boucles.

En raison de la complexité et de la grande diversité des phénomènes cosmologiques, les scientifiques construisent des modèles basés sur des programmes de recherche individualisés, en fonction du phénomène spécifique (phénomènes spécifiques aux trous noirs, par exemple), en prenant comme noyau dur les principes de la relativité générale ou la mécanique quantique. Par la suite, ces programmes de recherche tentent de s'unifier au sein des programmes de recherche unificateurs, tels que les trous noirs, ou même plus large, pour les singularités gravitationnelles ou spatio-temporelles. Pour chaque phénomène, il existe plusieurs programmes de recherche alternatifs, qui ne sont finalement reconnus que ceux qui ont un pouvoir heuristique plus élevé, mais il existe souvent des groupes de chercheurs plus petits qui n'abandonnent même pas les alternatives ayant un pouvoir heuristique plus faible.

Les programmes de recherche unificateurs peuvent être développés simultanément avec les programmes qui seront unifiés (et dans ce cas, on peut parler de programmes unifiés en tant que « **sous-programmes de recherche** »), ou plus tard, en choisissant parmi plusieurs programmes ceux qui conviennent le mieux avec le programme unificateur. C'est un moyen largement utilisé ces dernières années. Lorsqu'un concept évolue longtemps au travers de programmes de recherche indépendants, sans un programme unificateur pour les inclure, nous ne parlons pas de la méthodologie d'un programme de recherche donné, mais d'une reconstruction rationnelle de la science à laquelle ces programmes indépendants sont en concurrence.

1. La gravité newtonienne

Dans certains programmes de recherche, comme la théorie mécaniste de l'univers selon laquelle l'univers est une énorme horloge (et un système de tourbillons) avec la poussée comme cause unique du mouvement, la métaphysique cartésienne particulière fonctionnait comme un puissant principe heuristique : elle décourageait les théories scientifiques, telles que la version « essentialiste » de l'action à distance de Newton, qui lui était incompatible (*heuristique négative*). Et cela a encouragé les hypothèses auxiliaires qui auraient pu la sauver de contradictions apparentes, telles que les ellipses de Kepler (*heuristiques positives*).

La première édition de *Principia* de Newton ne contient que deux remarques supplémentaires sur la méthodologie: la notification que le but de l'article est d'expliquer « comment déterminer les véritables mouvements de leurs causes, les effets et les différences apparents et, au contraire, comment déterminer à partir des hypothèses si elles sont vraies ou apparentes, leurs causes et leurs effets »; [49] et, dans le Scholium à la fin du Livre 1, Section 11, Newton affirme que son approche distinctive permet une argumentation plus sûre dans la philosophie naturelle.

Dans la deuxième édition (1713), Newton a introduit des sections distinctes pour les phénomènes et les règles impliquées dans la détermination de la gravité universelle, [50] et à la fin du Scholium générale de la troisième édition, 1726, il a inclus l'énoncé méthodologique le plus célèbre :

> « Nous n'avons pas encore pu déduire des phénomènes[51] la raison de ces propriétés de la gravité et je ne devine pas d'hypothèses. Car ce qui ne se déduit pas de phénomènes doit s'appeler une hypothèse ; et les hypothèses, métaphysiques ou physiques, ou fondées sur des qualités occultes ou mécaniques, n'ont rien à voir avec la philosophie expérimentale. Dans cette philosophie expérimentale, les phrases sont déduites de phénomènes et généralisées par induction. L'impénétrabilité, la mobilité et la quantité de mouvemen des corps, les lois du mouvement et la loi de la gravité ont été trouvés par cette méthode. Et il suffit que la gravité existe vraiment et agisse conformément aux lois que nous avons énoncées et suffirait à tous les mouvements de nos corps célestes et de notre mer. » [52]

---

[49] Newton, « Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed. », paragr. XIV.

[50] Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*, 1713, https://www.e-rara.ch/zut/338618.

[51] Dans la philosophie contemporaine, « la déduction de phénomènes » est appelée « induction éliminatoire » et « induction démonstrative ».

[52] Isaac Newton, « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. », *Science* 177, nº 4046 (1726): 943, https://doi.org/10.1126/science.177.4046.340.

en ajoutant plus tard, « à moins que les hypothèses ou les questions aient été proposées pour être examinées expérimentalement. »[53]

Newton avertit dans *Principia* qu'il utilise la théorie mathématique d'une manière nouvelle, les forces traitées abstraitement, indépendamment du mécanisme, seulement mathématiquement. Clarke et Berkeley au 18ème siècle affirment que ces passages expriment un agnosticisme causal strict. Newton écrit que, en utilisant des termes tels que « attraction », il n'a pas l'intention de définir « une espèce ou un mode d'action ou une cause ou un motif physique ».[54]

Se référant à la prétention de Newton de « déduire » la loi de la gravité universelle du phénomène du mouvement orbital, Lakatos a affirmé que cette déclaration est au moins trompeuse et, au pire, un subterfuge. Seule une construction hypothétique-déductive de sa démonstration de la gravité universelle a du sens.

Selon Andrew Janiak, la lecture anti-métaphysique du traitement mathématique de la force de Newton est raisonnable. L'interprétation antimétaphysique peut être étayée par le fameux énoncé méthodologique de *Principia*, « *hypothèses non fingo* », « n'invente pas des hypothèses. »[55] Le traitement mathématique de la force pouvant être interprété comme exprimant un agnosticisme causal strict, se concentrant exclusivement sur des descriptions empiriques des méthodologies de Newton, la méthodologie de Newton peut être interprétée comme exprimant un agnosticisme métaphysique plus général.[56]

Pour Newton, la science, « la philosophie expérimentale », implique des phrases explicatives pouvant être « déduites de phénomènes ». Ce qui ne peut être déduit de cette manière n'est qu'une hypothèse. Mais Newton ne contourne pas les hypothèses, seulement ne les intègre pas dans la science, les considérant purement spéculatives. Leur place est réservée dans les interrogations

[53] Isaac Newton, *An Account of the Book Entitled Commercium Epistolicum Collinii & Aliorum, de Analysi Promota*, 1715, 312.

[54] Andrew Janiak, *Newton as Philosopher* (Cambridge University Press, 2010), 16.

[55] Lakatos affirme que la meilleure reconstruction rationnelle par Newton de la phrase célèbre « *hypothèses non fingo* » est vraisemblable ; « Je rejette la dégénérescence des commutations de problèmes conçus pour contenir certaines théories syntaxiquement métaphysiques » voir Imre Lakatos, « Criticism and the Methodology of Scientific Research Programmes », *Proceedings of the Aristotelian Society* 69, nº 1 (1968): 149–186. , voir Lakatos.Imre Lakatos,« La critique et la méthodologie des programmes de recherche scientifique », Actes de la Société aristotélicienne 69, n ° 1 (1968): 180.

[56] Janiak, *Newton as Philosopher*, 17.

d'*Optiques*,[57] et dans les annotations explicites de *Principia*. Les hypothèses sont développées par Newton lorsqu'il ne dispose pas d'un support empirique indépendant pour ces assertions.[58]

Du point de vue de Newton, la gravité n'est pas mécaniste ; mais il admet également qu'il ne connaît pas la « raison » des propriétés de la gravité exprimées dans la loi de la gravité universelle, à savoir qu'il n'a pas d'explication physique de cette force, refusant de faire des suppositions à ce sujet. Contrairement à Leibnitz, il déclare explicitement qu'une certaine causalité dans la nature est non mécanique, remettant en question la philosophie mécaniste en vigueur à cette époque. À cet égard, Stein et DiSalle affirment que Newton était un empiriste radical dans les débats métaphysiques : il rejette non seulement la philosophie mécaniste de Descartes, Leibniz et Huygens, mais transforme les questions métaphysiques considérées par eux comme purement *a priori* en question empiriques, dont les réponses dépendent du développement de la physique.[59]

Newton est prêt à occuper des positions métaphysiques, telles que dans la structure de l'espace-temps ou de la causalité, mais il rejette *a priori* les approches cartésiennes, faisant passer la physique avant la métaphysique, ce qui en fait de lui, selon Stein et DiSalle, non pas un anti-métaphysicien, mais un métaphysicien empirique, avec une attitude empirique fondée sur des principes à l'égard des questions métaphysiques.

Afin de comprendre le mouvement d'une manière compatible avec ses lois, Newton postule un espace absolu,[60] lui permettant ainsi de concevoir le mouvement comme un changement d'espace absolu. Cette idée permet à Newton de sauvegarder les effets perceptibles de l'accélération des corps en tant que mouvements réels dans l'espace absolu.[61]

La philosophie naturelle de Newton ne peut être comprise que si nous considérons sa conception de Dieu :

> « Newton a invoqué Dieu dans l'action à distance pour une raison spécifique, pour soutenir la gravité dans l'univers, mettant en garde contre une vision de l'univers comme une simple machine ... alors il a essayé de développer un concept sur Dieu qui fournirait un modèle stable, organisé et prévisible

---

[57] Isaac Newton, *Opticks : Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light* (London : Printed for William Innys at the West-End of St. Paul's, 1730), http://archive.org/details/opticksortreatis1730newt.

[58] Newton, « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. », 943.

[59] Janiak, *Newton as Philosopher*.

[60] În Scholium, declară explicit că spațiul absolut nu este perceptibil (Newton, « Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed. », 414.) fiind conștient că mișcarea adevărată este dificil de detectat dacă este mișcare absolută.

[61] Newton, « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. », 423.

> du monde naturel, un Dieu qui se fonde sur des principes rationnels et universels, accessible à tout le monde ... il lance un appel à Dieu pour expliquer les mécanismes qu'il ne peut expliquer autrement, y compris les actions à distance. »[62]

La théorie de la gravité de Newton a été fondamentalement rejetée par ses contemporains pour avoir violé les normes de la philosophie mécaniste. Selon Andrew Janiak, Newton a été contraint de défendre son traitement mathématique de la force et du mouvement sur une base métaphysique fondamentale.[63] Après la révolution de la physique au 17ème siècle, de la philosophie néo-aristotélicienne (« scolastique ») au cartésianisme, Newton a provoqué un nouveau changement de paradigme en remplaçant la philosophie mécaniste par la philosophie naturelle. Ce second schisme s'est produit en l'absence de continuité conceptuelle. Bien que dépourvu de système métaphysique, Newton se défendit en articulant une relation convaincante entre la physique mathématique et métaphysique dans des conflits d'espace et de temps, de matière, de lois du mouvement, de la nature des forces et de la relation de Dieu avec le monde.

Principia a déclenché un large débat parmi les contemporains de Newton sur la méthodologie à adopter pour étudier le monde naturel.

Pour Newton, la force était le concept principal expliquant le mouvement et ses causes dans la nature. Il a conçu les forces comme des actions éphémères, comme des quantités, via la connexion entre masse et accélération, offrant un moyen de mesurer les forces. Dans le Livre III de *Principia*, Newton identifie la force centripète qui maintient les orbites planétaires avec la force de gravité, ce qui provoque la chute libre d'objets sur la Terre. D'où la conclusion, au Livre III, que tous les corps sont attirés les uns par les autres proportionnellement à leur quantité de matière (gravité universelle). Il reconnaît toutefois qu'il ne connaît pas la cause de la gravité.[64]

Dans la septième phrase du Livre III de *Principia*, Newton parvint à la conclusion suivante : « La gravité agit universellement sur tous les corps et est proportionnelle à la quantité de matière qu'ils contiennent ».[65]

La méthodologie du principe de découverte des forces présentes dans la nature était controversée, y compris pour l'action à distance. Dans la deuxième édition de 1713, il a ajouté d'autres observations méthodologiques, appelées par lui « *regulae philosophandi* », ou règles de la

---

[62] Nicolae Sfetcu, *Isaac Newton despre acțiunea la distanță în gravitație - Cu sau fără Dumnezeu?* (MultiMedia Publishing, 2018), http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24577.97122.

[63] Janiak, *Newton as Philosopher*.

[64] Alexandre Koyre, *From the Closed World to the Infinite Universe* (Johns Hopkins University Press, 1957), 229.

[65] Newton, « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. », 810.

philosophie. Les deux premières règles font référence au raisonnement causal, et la troisième, très discutée par les contemporains, fait référence à un problème d'induction : nous avons des perceptions et des expériences pour la connaissance, mais sur quelle base pouvons-nous généraliser ? Newton donne une réponse partielle à la proposition sept du troisième livre de *Principia*, à la Règle 3:

> « Ces qualités des corps qui ne peuvent être ni projetés ni remis (c'est-à-dire augmentées et diminuées) et qui appartiennent à tous les corps sur lesquels des expériences peuvent être effectuées, doivent être considérées comme des qualités de tous les corps universels. » [66]

Newton relie cette troisième règle à ses lois du mouvement :

> « Le fait que tous les corps soient mobiles et persévèrent en mouvement ou au repos par certaines forces (nous les appelons forces d'inertie), nous en déduisons la recherche de ces propriétés dans les corps que nous avons vus. Extension, dureté, impénétrabilité, mobilité et force d'inertie [C'est une façon potentiellement déroutante de faire référence à la masse spécifique, ce que nous appellerions la masse inertielle d'un corps. Voir la troisième définition dans *Principia*[67].] De l'ensemble, apparaissent par le prolongement, la dureté, l'impénétrabilité, la mobilité et la force d'inertie de chaque partie ; et nous en arrivons ainsi à la conclusion que chacune des plus petites parties de tous les corps est étendue, forte, impénétrable, mobile et dotée d'une force d'inertie. Et ceci est le fondement de toute philosophie naturelle. » [68]

Leibniz a affirmé que l'espace euclidien tridimensionnel de Newton permet « des états distincts, mais *indiscernables* si les positions absolues de tous les corps matériels sont modifiées, tout en conservant leurs positions relatives ». [69] Les mêmes lois du mouvement sont valables dans tous les cadres inertiels. il serait donc impossible, en appliquant les lois de Newton, de déterminer le cadre inertiel. Leibniz conclut que nous devrions utiliser le principe de parcimonie pour rejeter de telles entités « métaphysiques ».

Mais la mécanique newtonienne ne satisfait pas le principe de relativité pour l'accélération absolue et la rotation absolue, mais uniquement pour les systèmes inertiels. Dans les systèmes accélérés ou en rotation, les lois de Newton ne sont plus valides. Il en résulterait que les accélérations et les rotations absolues ont une signification physique, ce qui crée un dilemme. Fondamentalement, la théorie combinée de l'espace et du temps newtoniens et de l'électrodynamique de Maxwell se révèle

---

[66] Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*

[67] Newton, « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. », 404-5.

[68] Newton, 95-96.

[69] Michael Friedman, *Foundations of Space-Time Theories: Relativistic Physics and Philosophy of Science* (Princeton University Press, 1983).

fausse.[70] Einstein résolut ce paradoxe en 1905 en maintenant les lois de Maxwell intactes mais en modifiant les transformations qui relient les cadres inertiels.

Newton a introduit le terme « philosophie expérimentale » en 1712, dans un passage de la Scholium generale de *Principia* où il a exposé sa méthodologie contre des hypothèses. Son but était de défendre sa théorie de la gravité contre les critiques, en particulier celle de Leibniz :

> « La philosophie expérimentale réduit les phénomènes à des règles générales et considère les règles comme étant générales lorsqu'elles sont généralement valables pour des phénomènes (...). La philosophie hypothétique consiste en des explications imaginaires de choses et en des arguments imaginaires pour ou contre de telles explications ou arguments. La philosophie expérimentale est basée sur l'induction. Le premier type de philosophie est suivi par moi, le dernier trop par Descartes, Leibniz et d'autres. »[71]

Le terme fait plutôt référence à la science empirique. Il fut également ajouté à la deuxième édition de *Principia* en 1713, où il a déclaré avoir démontré l'existence de la gravité, même s'il n'en trouvait pas la cause, en énumérant les différentes propriétés de la gravité. Newton expose également sa méthodologie à l'Interrogation 31 de l'*Optique*, où il s'intéresse à la force et à la philosophie naturelle. On considère que la philosophie expérimentale de Newton comporte deux éléments essentiels : l'exclusion des hypothèses de la philosophie naturelle ; et l'exigence que les phrases de la philosophie expérimentale soient « déduites des phénomènes et généralisées par induction ». Newton rejette donc l'hypothèse sans support expérimental. Ceux qui bénéficient d'un soutien expérimental, mais insuffisants pour aider à démontrer les principes scientifiques, sont autorisés mais distincts des principes établis, comme les interrogations d'*Optique*. Ce type d'hypothèse peut suggérer de nouvelles expériences et aider à expliquer les propriétés et les principes déjà découverts.

Dans la deuxième édition anglaise du *Principia* de 1717, Newton a détaillé le terme « philosophie expérimentale » et a introduit la méthode d'induction :

> « Cette analyse consiste à mener des expériences et des observations, et à en tirer des conclusions générales par induction et en n'acceptant pas les objections contre les conclusions, mais qui sont extraites d'expériences ou de certaines autres vérités. Parce que les hypothèses ne doivent pas être dissimulées dans la philosophie expérimentale. Et, bien que l'argumentation tirée d'expériences et d'observations par induction ne soit pas une démonstration des conclusions générales ; Cependant, c'est le meilleur moyen de discuter de ce que la Nature des choses reconnaît et peut être considéré comme le plus fort, plus l'induction est générale. Et s'il n'ya pas d'exception de Phaenomena, la Conclusion peut être généralement prononcée. Mais, à tout moment par la suite, toute Exception

[70] Friedman.

[71] Newton, « Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed. »

> émergera des expériences, elle pourra alors commencer à être prononcée avec les Exceptions telles qu'elles apparaissent. »[72]

Ainsi, l'existence de la gravité « a été prouvée par des démonstrations mathématiques basées sur des expériences et des phénomènes de la nature ; et M. Leibnitz ne peut nier qu'ils ont été prouvés ».

Selon Newton, la confirmation se fait d'abord par démonstration mathématique et ensuite par expérience. Il était convaincu qu'une approche mathématique déductive conduisait à la certitude et que l'expérience pouvait fournir certains fondements nécessaires à une science, mais jusqu'au 18ème siècle, il n'avait pas attribué à l'expérience la place de choix dans sa méthodologie.

Selon Laudan,[73] Newton considérait que l'un des objectifs centraux de la philosophie naturelle était de montrer la main du Créateur dans les détails de sa création : « parce que parler de Dieu à partir de l'apparence des choses, c'est certainement une philosophie naturelle ».[74] Les théories, selon Newton, peuvent être certaines ou très probables. Entre deux théories rivales, Newton aurait probablement choisi ce qui aurait favorisé ses objectifs cognitifs, comme dans le cas de la philosophie mécaniste. Mais il ne faut pas oublier que certaines des finalités cognitives de Newton diffèrent de celles d'aujourd'hui. Par conséquent, selon Laudan, nous pouvons évaluer leur rationalité en déterminant si leurs actions ont favorisé certains objectifs, et leurs actions ne peuvent être déterminées comme rationnelles que par référence au produit pondéré correspondant de leurs utilités cognitives.

Selon Robert Disalle, Newton propose des arguments inductifs pour une conclusion métaphysique, tandis qu'Einstein utilise des analyses épistémologiques pour décomposer les notions métaphysiques. Mais les arguments de Newton ont la même forme de base et le même but que ceux d'Einstein. Les expériences de pensée de Newton concernant le seau d'eau sont essentiellement des arguments en faveur d'une manière de relier des processus physiques aux structures de l'espace et du temps.[75]

Jusqu'au moins la seconde moitié du siècle, les systèmes de Locke et Newton étaient perçus comme étant basés sur des principes et des méthodes très similaires, composés de philosophie naturelle et morale. Locke et Newton partagent une conception similaire de la méthode scientifique, basée sur des expériences et des observations rationnelles et régulières et sur l'utilisation de la généralisation et de la déduction. Ainsi, G. A. Rogers a écrit :

---

[72] Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*, 404.

[73] Laudan, *Progress and its Problems*.

[74] Newton, « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. »

[75] Robert Disalle, « Spacetime Theory as Physical Geometry », *Erkenntnis* 42, nº 3 (1995): 317–337.

> « Ce que Locke a trouvé dans *Principia* était d'illustrer une méthode à laquelle il avait déjà souscrit. Il croyait déjà qu'une combinaison d'observation, de généralisation ou d'induction et de déduction est le seul moyen de connaître la nature, et que *Principia* a exactement cette méthode de la manière la plus fructueuse. Il lui confirma toutes ses propres conclusions méthodologiques. Le principe était pour Locke la justification d'une approche méthodologique générale à laquelle il avait probablement souscrit depuis vingt ans. » [76]

Hume associe aussi explicitement à son travail la méthode de Newton, bien qu'il existe une distinction claire entre l'inductivisme de Hume et la conception de Locke de la méthodologie des sciences naturelles. [77]

1.1 L'heuristique de la gravité newtonienne

L'exemple classique d'un programme de recherche réussi est la théorie gravitationnelle de Newton, probablement le programme de recherche lakatosien le plus réussi. Initialement, la théorie gravitationnelle de Newton était confrontée à de nombreuses « anomalies » (« contre-exemples ») et contredisait les théories observationnelles qui soutenaient ces anomalies. Mais les partisans du programme de recherche sur la gravité newtonienne ont transformé chaque anomalie en cas corroborants. De plus, ils ont eux-mêmes indiqué des contre-exemples qu'ils ont ensuite expliqués à travers la théorie newtonienne. [78] Selon Lakatos, « dans le programme de Newton, l'heuristique négative nous invite à rediriger *modus tollens* à partir des trois lois de la dynamique de Newton et de sa loi de gravité. Ce « noyau » est « irréfutable » par la décision méthodologique de ses partisans : les anomalies ne doivent conduire à des changements que dans la ceinture « protectrice » des auxiliaires, des hypothèses « observationnelles » et des conditions initiales ». [79]

Newton a établi l'heuristique positive de son programme de recherche grâce à une stratégie d'approches successives. [80] Les trois premières lois du mouvement de Newton réglementaient le raisonnement inductif, ainsi que la vision de Newton d'une taxonomie fondamentale basée sur les forces physiques (interactions). Il est parti d'un système solaire idéalisé, avec un soleil ponctuel et une seule planète tournant autour du Soleil. Il a ensuite considéré que l'orbite de la planète est une

---

[76] G. A. J. Rogers, « Locke's Essay and Newton's Principia », *Journal of the History of Ideas* 39, nº 2 (1978): 217-32, 229.

[77] Graciela de Pierris, « Hume and Locke on Scientific Methodology: The Newtonian Legacy », *Hume Studies* 32, nº 2 (2006): 277–329.

[78] Pierre-Simon Marquis De Laplace, *Exposition du systéme du monde*, 2ᵉ éd. (Cambridge; 2009: Cambridge University Press, 2009).

[79] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 48.

[80] Lakatos, « Criticism and the Methodology of Scientific Research Programmes ».

ellipse, dérivant la proportionnalité entre la force gravitationnelle et l'inverse du carré de la distance entre la planète et le Soleil.

La généralisation inductive de Newton considérait un mouvement élémentaire avec une force statique incluse dans la loi de gravité déduite, et l'idée que les mouvements planétaires pouvaient être généralisés. Telles sont ses hypothèses de travail sur la base desquelles il a procédé à ses généralisations inductives. Ils offrent une protection immédiate du noyau dur du programme de recherche newtonien (heuristique négative), en exigeant que les preuves développées à partir des données soient de haute qualité. [81] La déduction de la loi de la gravité remplissait cette exigence dans une plus large mesure que son raisonnement démonstratif, mais la « déduction » était principalement basée sur le mouvement de seulement cinq planètes dans une courte période astronomique.

Newton reconnaît le risque d'introduire de telles hypothèses de travail taxonomiques dans la généralisation inductive, dans le passage méthodologique le plus célèbre en *Optiks*, en discutant de méthodes « d'analyse et de synthèse » dans le paragraphe suivant de l'interrogation finale, qui a été ajouté en 1706. Il a a considéré que le succès obtenu à partir des généralisations sans restriction est la meilleure protection contre le risque introduit par les inévitables hypothèses taxonomiques qui entrent en induction. [82]

Ce modèle contredit la loi d'action et de réaction que Newton incluait dans le noyau dur, alors il a développé un modèle plus complexe, dans lequel le soleil et la planète tournaient autour de leur centre de poids commun. Il n'a généré aucune anomalie, mais il était difficile d'en déduire les lois réelles du mouvement pour plusieurs corps. Ainsi Newton a développé une nouvelle théorie, pour plusieurs planètes, avec des interactions entre chaque planète et le Soleil mais en négligeant les interactions entre planètes.

Après la vérification intermédiaire de cette théorie, Newton a développé une théorie plus complexe, considérant que le Soleil et les planètes ne sont pas ponctuels, mais des sphères de dimensions autres que zéro, car en théorie il devait tenir compte de la densité des corps, et ne pouvait pas accepter qu'un corps ponctuel ait une densité infinie. Il a également pris en compte le mouvement de rotation des corps autour de leurs propres axes. Dans le modèle suivant, il a pris en compte la forme non sphérique de la Terre et la variation de la gravité de la surface avec la latitude, l'orbite de la Lune, les marées, la précession des équinoxes et les trajectoires des comètes. À travers cette heuristique positive, il a essayé de se protéger contre les risques qui apparaissent dans le saut inductif, poussant immédiatement la théorie à analyser tous les phénomènes pertinents et l'utilisant

---

[81] I. Bernard Cohen et George E. Smith, *The Cambridge Companion to Newton* (Cambridge University Press, 2006).

[82] Cohen et Smith.

comme un outil de recherche pour les problèmes rencontrés. [83] Dans le même temps, les déductions pour la Terre lui ont permis de généraliser de la gravité céleste à la gravité universelle, ainsi que la précession des équinoxes indirectement, en tenant compte des forces (interactions) entre les planètes, en calculant les perturbations résultantes. La marée et la précession des équinoxes ont permis la généralisation des forces centripètes simples à une gravité interactive, tout comme l'étude des orbites de Jupiter et de Saturne. Et l'étude des comètes a permis d'étendre la loi de la gravité à d'éventuels corps d'une matière très différente.

Il n'a publié les résultats de son programme de recherche seulement quand il a considéré qu'il avait obtenu autant que possible d'observations et de mathématiques. Le processus de comparaison avec les phénomènes et les arguments pour l'universalité de la gravité s'étend tout au long du Livre 3.

La généralisation inductive de Newton pour la gravité universelle a introduit un élément conjectural falsifiable important, qui a ensuite été vérifié, fournissant la preuve la plus convaincante en sa faveur. L'idée de base était que toute divergence entre la théorie newtonienne et l'observation se révélerait physiquement significative et nous en dirait plus sur le monde physique. Ce faisant, les hypothèses de travail taxonomiques qui sous-tendent l'étape inductive de Newton vers la gravité universelle restent intactes, à mesure que la théorie avance.

Sur la base des hypothèses contestables supplémentaires et des suggestions concernant les mouvements de Jupiter et de Saturne, Newton a lancé sa propre séquence d'approximations successives selon le *Principia*. Même après la parution de la troisième édition du *Principia*, après environ quarante ans, chacun de ces sujets du *Principia* était encore à l'étude. L'argument de Newton pour la gravité universelle n'a été achevé qu'un siècle après la publication de la première édition de *Principia*.

Newton a prévu les développements ultérieurs de ses modèles à partir du premier modèle entièrement idéalisé. Il a compris que les modèles intermédiaires contiendraient des anomalies, mais il a dû les parcourir pour développer l'appareil mathématique en confrontant les modèles et en modifiant la théorie en cours de route afin d'éliminer les anomalies.

Newton a affirmé que par *Principia* il illustrait une nouvelle approche de l'enquête empirique. Mais, outre la remarque sur la dérivation des forces des phénomènes de mouvement et puis des mouvements de ces forces dans la Préface à la première édition, et la remarque sur la comparaison d'une théorie mathématique générique des forces centripètes avec les phénomènes pour connaître les conditions d'action de la force, dès la fin du Livre 1, Section 11, la seule remarque notable sur

[83] Cohen et Smith.

la méthodologie est le fameux passage du Scholium général ajouté dans la deuxième édition comme déclaration finale. [84]

Le succès sans précédent de la théorie de la gravité de Newton a stimulé l'intérêt pour la méthodologie du *Principia* à utiliser dans d'autres domaines. Deux aspects de la méthodologie sont évidents pour George Smith[85] : Newton a opposé sa méthode à celle d'hypothèses « cachées », et l'exigence que les questions soient considérées comme ouvertes tant que des considérations empiriques ne leur ont pas encore donné de réponses (une exigence parfaitement conforme à la tolérance méthodologie proposée par Lakatos dans les programmes de recherche). Le but de la méthode était de limiter les prétentions théoriques aux « généralisations inductives ».

Chaque modèle successif du programme de Newton prédit un fait nouveau, c'est une augmentation du contenu empirique : il constitue un *changement théorique progressif* cohérent. Et chaque prédiction est finalement vérifiée, même si auparavant elle aurait pu être instantanément « réfutée ».

L'idée centrale de la méthode inductive newtonienne est que les lois universelles dérivent par induction des « qualités manifestes » ou « phénomènes » observés, et seuls les phénomènes observés peuvent nous conduire à la révision de ces lois. Newton s'oppose explicitement aux explications purement hypothétiques de la philosophie mécaniste. Leibniz et Huygens ont accepté la démonstration de Newton selon laquelle les orbites des satellites des grands corps astronomiques du système solaire obéissent à la loi du carré inverse, mais ils ont rejeté la loi de Newton de la gravité universelle car ils étaient liés à la philosophie mécaniste. Les règles de Newton III et IV ont été ajoutées aux deuxième (1713) et troisième (1726) éditions du Principe en réponse aux objections des philosophes mécanistes :

> Règle III : « Les qualités des corps qui ne peuvent être voulues et remises [c'est-à-dire ne peuvent pas être agrandies et diminuées] et qui appartiennent à tous les corps sur lesquels des expériences peuvent être effectuées, devraient être considérées comme des qualités de tous les corps universels. » [86]

> Règle IV : « Dans la philosophie expérimentale, les phrases recueillies à partir de phénomènes par induction doivent être considérées comme exactes ou très vraies, malgré toutes hypothèses

[84] George Smith, « Newton's Philosophiae Naturalis Principia Mathematica », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Winter 2008 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2008), https://plato.stanford.edu/archives/win2008/entries/newton-principia/.

[85] Smith.

[86] Newton, « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. », 795.

> contraires, jusqu'à ce que d'autres phénomènes ne rendent pas ces phrases plus précises ou sujettes à des exceptions. »[87]

Ces règles stipulent que la méthode de l'universalisation inductive doit être appliquée sans les interférences des hypothèses. Newton déclare explicitement que les hypothèses de la philosophie mécaniste entravent sa méthode. Il illustre ici l'utilisation de sa méthode en décrivant d'abord l'inférence inductive de la loi universelle que tous les corps sont étendus.

Bernard Cohen décrit ainsi l'heuristique positive de Newton, dans le chapitre 5 de *The Cambridge Companion to Newton* comme le « style newtonien » progressive[88] : (1) le problème d'« un seul corps», (2) les problèmes des «deux corps», (3) les problèmes des trois ou plusieurs corps en interaction. Ainsi, Newton doit aborder la complexité d'un mouvement orbital réel dans une succession d'approximations successives, chaque approximation étant un mouvement idéalisé, et avec des écarts systématiques, fournissant des preuves pour la prochaine étape de la séquence.

Dans ses modèles idéalisés, Newton a imposé deux restrictions sur les approximations successives. [89] Dans chaque cas où il déduit certaines caractéristiques des forces gravitationnelles célestes, il a soutenu que la conséquence de la déduction « si-alors » maintient toujours la proximité tant que l'antécédent maintient la proximité. Et les résultats mathématiques établis dans le Livre 1 lui permettent d'identifier les conditions spécifiques dans lesquelles le phénomène à partir duquel la déduction est faite aurait non seulement la proximité, mais aussi la précision. Il s'ensuit que les « déductions » de Newton des phénomènes impliquent d'essayer d'aborder la complexité des mouvements du monde réel dans une séquence d'idéalisations progressives de plus en plus complexes, avec des écarts systématiques des idéalisations, chaque modèle servant de base au modèle suivant plus complexe. Les écarts systématiques sont appelés « phénomènes secondaires » lorsqu'ils ne sont pas observables en soi, mais théoriquement déduits. [90] Cela respecte *la première règle de Newton pour la philosophie naturelle* - qu'il ne faut pas admettre plus de causes que des causes vraies et suffisantes pour expliquer un phénomène.

La loi de gravité de Newton fournit une explication des règles de Kepler et des mouvements orbitaux idéalisés pour chaque modèle précédemment idéalisé, ce qui lui confère un pouvoir heuristique supérieur à tout modèle précédent. Par cette loi, on peut expliquer pourquoi ces idéalisations sont valables au moins à proximité.

---

[87] Newton, 796.

[88] Cohen et Smith, *The Cambridge Companion to Newton*.

[89] Domenico Meli, « The Relativization of Centrifugal Force », *Isis: A Journal of the History of Science* 81 (1990): 33.

[90] Cohen et Smith, *The Cambridge Companion to Newton*.

Du point de vue de Lakatos, trois systèmes scientifiques étaient en concurrence au 17e siècle : le programme de recherche d'Aristote, celui de Descartes et le programme de Newton qui apparaissaient comme un rival du programme de Descartes. Les programmes de Descartes et de Newton étaient progressifs par rapport à ceux d'Aristote et pouvaient expliquer les mouvements des comètes et des marées. Les cartésiens pourraient expliquer pourquoi la lune gardait toujours la même face au sol et pourquoi toutes les planètes tournent dans la même direction, tandis que les newtoniens pouvaient expliquer comment les planètes s'influencent mutuellement. [91] Les différences explicatives résultaient de différents noyaux durs. Le cœur du programme cartésien spécifiait l'action de contact et interdisait explicitement le concept d'action à distance.

Le programme de Newton comprend également des éléments de l'ancien programme cartésien, comme l'action de contact. Il s'agit d'un exemple d'échange fructueux entre programmes. Mais les preuves empiriques ont finalement conduit à l'échec du programme cartésien.

Le programme de Lorentz a atteint une position dominante au début du 20e siècle, puis a été dépassé par Einstein, à la fois théoriquement et empiriquement, presque immédiatement après son lancement en 1905. [92] Bien que le programme de Lorentz fût également progressif, le programme de relativité a surmonté, étant toujours plus progressif et assimilant les transformations de Lorentz. [93]

Dans le succès du programme d'Einstein, plusieurs programmes de recherche ont été impliqués: le programme newtonien, provoqué par un programme soutenu par Lorentz[94] qui a fait que l'électromagnétisme être accepté comme plus fondamental que la mécanique; un deuxième programme rival soutenu par Ostwald et Mach à travers lequel une tentative a été faite pour développer une physique purement phénoménologique, avec l'énergie comme concept de base; [95] le programme d'Einstein qui a impliqué les théories de la relativité; et le programme de physique quantique initié par Bohr et développé par les théories de Heisenberg, Schrodinger et Dirac.

Au cours des deux premières décennies du 20e siècle, la physique quantique a vaincu le programme phénoménologique et a remplacé la physique newtonienne, mais les mathématiques et l'ontologie du nouveau programme étaient incompatibles avec les mathématiques et l'ontologie du programme d'Einstein. Cependant, ces programmes coexistent aujourd'hui. La rivalité entre ces programmes a

---

[91] E. J. Aiton, *Vortex Theory of Planetary Motions*, First Edition edition (London; New York: American Elsevier Publishing Co., Inc., 1972).

[92] Elie Zahar, « Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II) », *British Journal for the Philosophy of Science* 24, nº 3 (1973): 211-75.

[93] Gholson et Barker, « Kuhn, Lakatos, and Laudan ».

[94] Zahar, « Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? »

[95] Niles Holt, « Wilhelm Ostwald's 'The Bridge' », *British Journal for the History of Science* 10, nº 2 (1977): 146–150.

stagné dans les années 40 et 50, renaissant avec l'avènement de la radioastronomie, qui a permis de nouveaux progrès empiriques.

La méthodologie de Lakatos offre un puissant cadre conceptuel qui, comme dans le cas de Kuhn, découle de l'analyse d'épisodes historiques en physique. Mais contrairement à Kuhn, Lakatos a présenté une méthodologie qui évite les problèmes d'incommensurabilité[96] (1) et d'irrationalisme, et démontre que les preuves empiriques sont l'arbitre final des programmes de recherche concurrents. [97]

1.2 Prolifération des théories post-newtoniennes

Les théoriciens ont formulé un ensemble de critères fondamentaux que toute théorie de la gravité devrait satisfaire, deux purement théoriques et deux fondés sur des preuves expérimentales. [98] Ainsi, une théorie doit être :

1. *Complet* (capable d'analyser à partir des « premiers principes » le résultat de toute expérience d'intérêt)
2. *Auto-cohérent* (sa prédiction pour le résultat de chaque expérience doit être unique)
3. *Relativiste* (à la limite où la gravité est négligée par rapport à d'autres interactions physiques, les lois non gravitationnelles de la physique doivent être réduites à des lois de relativité spéciales)
4. Avec la *limite newtonienne correcte* (dans les limites des champs gravitationnels faibles et des mouvements lents, ils doivent reproduire les lois de Newton).

Les principales théories de la gravité de 1686 à 1900, jusqu'à ce que Lorentz ait développé sa propre théorie puis l'élaboration des théories de la relativité d'Einstein, sont

- *Loi de Newton* sur la gravité universelle (1686) : La théorie de Newton est considérée comme étant exactement dans les limites des champs de gravité et des vitesses faibles et toutes les autres théories de la gravité doivent reproduire la théorie de Newton dans les limites appropriées.
- *Explications mécanistiques* (1650-1900): Théories bifurquées ayant une théorie mécaniste de noyau dur; ils ont échoué parce que la plupart ont conduit à une valeur inacceptable de la dragage de l'éther, qui n'est pas confirmée, viole la loi sur la conservation de l'énergie et est incompatible avec la thermodynamique moderne. [99]

---

[96] Deux théories sont incommensurables si elles sont intégrées dans un cadre conceptuel fortement contrasté, dont les langages ne se chevauchent pas suffisamment pour permettre aux scientifiques de comparer directement les théories ou de citer des preuves empiriques favorisant une théorie par rapport à l'autre.

[97] Gholson et Barker, « Kuhn, Lakatos, and Laudan ».

[98] Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, Revised edition (Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993).

[99] Grant, *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages*, 60-61.

- René Descartes (1644) et Christiaan Huygens (1690) ont utilisé des vortex pour expliquer mécaniste la gravité. [100] Newton s'est opposé à la théorie en arguant du manque de déviations d'orbite grâce à la résistance fluide-dynamique, à la direction parfois différente des satellites naturels comparativement à la direction du vortex, et aux explications circulaires de Huygens.

- *Modèles électrostatiques* (1870-1900): On a essayé de combiner les lois de Newton avec celles de l'électrodynamique (Weber, Carl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann, James Clerk Maxwell), essayant d'expliquer l'avance du périhélie de Mercure. Il y a eu des succès partiels, en 1890 (Lévy) et en 1898 (Paul Gerber), mais ils ont été rejetés parce qu'ils étaient basés sur des hypothèses qui se sont révélées fausses par la suite. [101]
  - Robert Hooke (1671) et James Challis (1869) ont supposé que chaque corps émette des ondes dont l'effet est l'attraction entre les corps. Maxwell a soutenu que cette théorie nécessite une production constante d'ondes, qui doit s'accompagner d'une consommation d'énergie infinie. Challis lui-même a reconnu qu'il n'était pas parvenu à un résultat précis en raison de la complexité des processus. [102]
  - Y compris Isaac Newton (1675), et plus tard Bernhard Riemann (1853) ont proposé une théorie selon laquelle les flux éthériques déplacent tous les corps les uns vers les autres. [103] Comme pour la théorie de Le Sage, la théorie viole la loi de conservation de l'énergie. Il existe également des problèmes liés à l'interaction des corps avec l'éther.
  - Nicolas Fatio de Duillier (1690) et Georges-Louis Le Sage (1748) ont proposé un modèle corpusculaire, utilisant une sorte de mécanisme de criblage ou d'ombrage - une bifurcation de la loi de Newton qui respecte la loi des carrés inverses. Il a été réinventé, entre autres, par Lord Kelvin (1872) et Hendrik Lorentz (1900), et critiqué par James Clerk Maxwell (1875) et Henri Poincaré (1908) notamment pour les anomalies thermodynamiques. La théorie de Le Sage a été étudiée par Radzievskii et Kagalnikova (1960), Shneiderov (1961), Buonomano et Engels (1976), Adamut (1982), Jaakkola (1996), Tom Van Flandern (1999) et Edwards

[100] Christiaan Huygens, *Discours de La Cause de La Pesanteur*, 1885, 443-88.

[101] J. Zenneck, « Gravitation », in *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen: Fünfter Band in Drei Teilen Physik*, éd. par A. Sommerfeld (Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1903), 25-67, https://doi.org/10.1007/978-3-663-16016-8_2.

[102] James Challis, *Notes on the Principles of Pure and Applied Calculation: And Applications of Mathematical Principles to Theories of the Physical Forces.* (University of Michigan Library, 1869).

[103] B. Riemann, *Neue mathematische Prinzipien der Naturphilosophie* (Leipzig: Dedekind, R.; Weber, W., 1876).

(2007). Une variété de modèles de Le Sage et des sujets connexes sont discutés dans Edwards et al. [104]

- Newton a proposé une seconde théorie basée sur l'éther (1717) développée plus tard par Leonhard Euler (1760) dans laquelle l'éther perd sa densité près de la masse, conduisant à une force nette dirigée vers les corps. [105] James Clerk Maxwell a souligné que, dans ce modèle « hydrostatique », « la demande que nous devons supposer existe dans l'environnement invisible est 3000 fois supérieure à celle que l'acier le plus résistant pourrait supporter ».
- Plus tard, un modèle similaire a été créé par Hendrik Lorentz, qui a utilisé le rayonnement électromagnétique au lieu des corpuscules.
- Lord Kelvin (1871) et Carl Anton Bjerknes (1871) ont estimé que chaque corps vibre, ce qui pourrait être une explication de la gravité et des charges électriques. Cette hypothèse a également été étudiée par George Gabriel Stokes et Woldemar Voigt. Mais la théorie force l'hypothèse que toutes les pulsations dans l'univers sont en phase, ce qui semble hautement improbable. Et l'éther devrait être incompressible. Maxwell a soutenu que ce processus doit s'accompagner d'une nouvelle production et d'une destruction permanente de l'éther.

Clifford M. Will explique, dans *Theory and experiment in gravitational physics*, les motivations de certaines de ces théories, y compris après l'élaboration de la relativité générale et de la théorie quantique, [106] qui incluent des bifurcations de la théorie initiale de Newton, ou ne répondent pas aux critères actuels d'une théorie gravitationnelle, avec l'observation qu'il est possible que, dans le cas de la modification des formes actuelles, certaines de ces théories puissent par la suite répondre à ces critères:

- Théorie newtonienne de la gravité : elle n'est pas relativiste
- Relativité cinématique de Milne[107] : elle a été initialement conçue pour résoudre certains problèmes cosmologiques. Il est incomplet - il ne prédit pas le déplacement gravitationnel vers le rouge.

---

[104] Matthew R. Edwards, éd., *Pushing Gravity: New Perspectives on Le Sage's Theory of Gravitation*, y First edition edition (Montreal: Apeiron, 2002).

[105] Leonhard Euler, *Briefe an eine deutsche Prinzessin, aus dem Französischen übersetzt* (Junius, 1773), https://books.google.ro/books?id=FaMAAAAAMAAJ.

[106] Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

[107] E. A. Milne, *Kinematic relativity* (Facsimile Publisher, 2015), 566-78.

- Les différentes théories vectorielles de Kustaanheimo[108] [109] : contiennent un champ gravitationnel vectoriel dans l'espace-temps plat. Ils sont incomplets - ils ne peuvent pas être couplés avec les autres lois de la physique non gravitationnelle (équations de Maxwell), à moins d'imposer un espace-temps plat. Ils sont incohérents - ils donnent des résultats différents dans la propagation de la lumière pour les aspects corpusculaires et ondulatoires de la lumière.
- Théorie de Poincaré (généralisée par Whitrow et Morduch): la théorie de l'action à distance dans l'espace-temps plat. Elle est incomplète ou incohérente au même titre que les théories de Kustaanheimo. [110]
- Théorie vectorielle de Whitrow-Morduch (1965): contient un champ gravitationnel vectoriel dans un espace plat. Elle est incomplète ou incohérente au même titre que les théories de Kustaanheimo. [111]
- Théorie de Birkhoff (1943) : contient un champ gravitationnel tensoriel utilisé pour construire une métrique. Il viole la limite newtonienne par les conditions spécifiques imposées. [112]
- Théorie de Yilmaz (1971, 1973) : contient un champ gravitationnel tensoriel utilisé pour construire une métrique. Il est mathématiquement incohérent - la dépendance fonctionnelle des métriques sur le champ tensoriel n'est pas bien définie. [113]

D'autres théories historiques alternatives développées au fil du temps ont été réfutées par des vérifications expérimentales ou remplacées par des théories mieux corroborées :

- En 1690, Pierre Varignon a supposé que tous les corps étaient exposés à des poussées de particules d'éther de toutes les directions, avec une limitation à une certaine distance de la surface de la Terre, sous laquelle les corps seraient plus attirés par la Terre. [114]

---

[108] Paul Edwin Kustaanheimo et V. S. Nuotio, *Relativistic Theories of Gravitation* (Helsingin Yliopisto. Department of Applied Mathematics, 1967).

[109] G. J. Whitrow et G. E. Morduch, « Relativistic theories of gravitation : A comparative analysis with particular reference to astronomical tests », *Vistas in Astronomy* 6 (1965): 1-67, https://doi.org/10.1016/0083-6656(65)90002-4.

[110] Whitrow et Morduch, « Relativistic theories of gravitation ».

[111] Whitrow et Morduch.

[112] George D. Birkhoff, « Matter, Electricity and Gravitation in Flat Space-Time », *Proceedings of the National Academy of Sciences* 29, nº 8 (1 août 1943): 231-39, https://doi.org/10.1073/pnas.29.8.231.

[113] Hüseyin Yilmaz, « New approach to relativity and gravitation », *Annals of Physics* 81, nº 1 (1 novembre 1973): 81, https://doi.org/10.1016/0003-4916(73)90485-5.

[114] Pierre (1654-1722) Auteur du texte Varignon, *Nouvelles Conjectures Sur La Pesanteur , Par M. Varignon,...*, 1690, https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k74179x.

- En 1748, Mikhail Lomonosov a supposé que l'effet de l'éther soit proportionnel à la surface complète des composants élémentaires dont la matière est composée. [115]
- En 1821, John Herapath a tenté d'appliquer le modèle co-développé de la théorie cinétique des gaz à la gravité. Il a supposé que l'éther soit chauffé par les corps et que la densité diminue, ce qui pousse les corps dans cette direction. [116] Taylor a montré que la faible densité due à l'expansion thermique est compensée par l'augmentation de la vitesse des particules chauffées ; par conséquent, aucune attraction n'apparaît.
- Théorie de la gravité de Ritz, [117] électrodynamique de Weber-Gauss appliquée à la gravité. Promotion classique des périhélies. [118]
- La théorie de la gravité de Nordström (1912, 1913), un des premiers concurrents de la relativité générale.
- Théorie de Kaluza Klein (1921) [119]
- La théorie de la gravité de Whitehead (1922), un autre concurrent précoce de la relativité générale.

La théorie de l'éther de Lorentz a été développée à partir de la « théorie des électrons » d'Hendrik Lorentz, entre 1892 et 1895, la considérant comme un éther complètement immobile. [120] Elle a introduit une hypothèse *ad hoc* pour annuler l'échec des expériences négatives de déviation d'éther de premier ordre en *v/c* en introduisant une variable auxiliaire appelée « heure locale ». Le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley a conduit à l'introduction d'une autre hypothèse *ad hoc*, de la contraction de la longueur, en 1892. Mais les expériences ultérieures n'ont pas non plus confirmé la théorie, qui est devenue une théorie dégénérée selon Lakatos. Lorentz a

---

[115] Mikhail Vasil'evich Lomonosov, *Mikhail Vasil'evich Lomonosov on the Corpuscular Theory*, First edition. edition (Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1970), 224–233.

[116] J Herapath, « On the Causes, Laws and Phenomena of Heat, Gases, Gravitation I, II, III, in Annals of Philosophy, or Magazine of Chemistry, Mineralogy, Mechanics, Natural History, Agriculture and the Arts 1 Pp. 273–293 », Atticus Rare Books, 1821, 273-93, https://www.atticusrarebooks.com/pages/books/761/john-herapath/on-the-causes-laws-and-phenomena-of-heat-gases-gravitation-i-ii-iii-in-annals-of-philosophy-or.

[117] Walther Ritz, « Recherches critiques sur l'électrodynamique générale », *Annales de chimie et de physique*, 1908, 267-71.

[118] Ritz, 267–271.

[119] Theodor Kaluza, « Zum Unitätsproblem in der Physik | BibSonomy », 1921, 966–972, https://www.bibsonomy.org/bibtex/19218e3a965ffaefa3af2d4c14bb5ae52/zhaozhh02.

[120] Hendrik A. Lorentz, « Considerations on Gravitation », in *The Genesis of General Relativity*, éd. par Michel Janssen et al., Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 2007), 559–574, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_13.

tenté de la revitaliser en 1899 et 1904 en introduisant la transformation de Lorentz. Mais ni les nouveaux modèles théoriques n'ont résolu le problème de l'éther. Henri Poincaré a corrigé les erreurs en 1905 et a incorporé les effets non électromagnétiques dans la théorie, en l'appelant « Nouvelle mécanique » et en utilisant pour la première fois l'expression « principe de relativité ». [121] Il a également critiqué Lorentz pour avoir introduit trop d'hypothèses utiles dans sa théorie. Plus tard, Minkowski (1908) et Arnold Sommerfeld (1910) ont également essayé de développer une loi de gravité invariante Lorentz. [122] La théorie de Poincaré a résisté à une période en raison de son plus grand pouvoir heuristique, mais il a été vaincu par la relativité restreinte d'Albert Einstein, qui a également repris certaines des idées de cette théorie. Lorentz a reconnu en 1914 que sa théorie était incompatible avec le principe de relativité et l'a rejeté. [123] À l'heure actuelle, certains physiciens considèrent la théorie de Lorentz développée plus tard par Poincaré comme une interprétation spéciale, « lorentienne » ou « néo-lorenzienne », de la relativité restreinte. [124] Étant donné que les deux utilisent des transformations de Lorentz et le même formalisme mathématique, il n'est pas possible de faire la distinction entre les deux théories par expérience. La différence entre elles est que Lorentz suppose l'existence d'un éther indétectable.

La dynamique newtonienne modifiée (MOND) est une théorie qui propose de modifier la loi de Newton de la gravité universelle dans le but de prendre en compte les propriétés observées des galaxies. MOND essaie d'éliminer la théorie controversée de la matière noire. Il a été développé

---

[121] Henri Poincaré, « Les Relations Entre La Physique Expérimentale et La Physique Mathématique, in Revue Générale Des Sciences Pures et Appliquées », issue, Gallica, 1900, 1163–1175, https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k17075r.

[122] Scott Walter, « Breaking in the 4-Vectors: The Four-Dimensional Movement in Gravitation, 1905–1910 », in *The Genesis of General Relativity*, éd. par Michel Janssen et al., Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 2007), 193–252, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_18.

[123] Eduard Prugovecki, « Historical and Epistemological Perspectives on Developments in Relativity and Quantum Theory », ResearchGate, 1992, https://www.researchgate.net/publication/300434048_Historical_and_Epistemological_Perspectives_on_Developments_in_Relativity_and_Quantum_Theory.

[124] Quentin Smith, *Einstein, Relativity and Absolute Simultaneity*, éd. par William Lane Craig, 1 edition (London: Routledge, 2007).

en 1982 et publié en 1983 par le physicien israélien Mordehai Milgrom. [125] Milgrom a introduit l'hypothèse que la force gravitationnelle subie par une étoile dans les régions extérieures d'une galaxie est proportionnelle au carré de l'accélération centripète (par opposition à la proportionnalité simple, de la deuxième loi de Newton) ou, alternativement, que la force gravitationnelle dans ces cas varient inversement proportionnellement au rayon (par opposition au carré inverse du rayon dans la loi de gravité de Newton). Dans le MONDE, la modification des lois de Newton n'a lieu que pour le mouvement des galaxies, à des accélérations extrêmement faibles.

MOND a prédit avec succès des phénomènes galactiques inexpliqués grâce à la théorie de la matière noire, [126] mais ne parvient pas à confirmer les propriétés des clusters de galaxies, ni à développer un modèle cosmologique qui rivalise avec le modèle ΛCDM actuel. [127] La mesure exacte de la vitesse des ondes gravitationnelles par rapport à la vitesse de la lumière en 2017 n'a pas exclu les théories MOND.

Une grande variété de phénomènes astrophysiques sont corroborés par le MOND, [128] [129] tels que :

- Relation concrète entre la masse baryonique totale de la galaxie et la vitesse de rotation asymptotique selon la prédiction MOND.
- MOND prédit une bien meilleure corrélation entre les caractéristiques de la distribution de la masse non barionique et la courbe de rotation que l'hypothèse de la matière noire, observée dans plusieurs galaxies spirales.
- MOND prédit une relation spécifique entre l'accélération des étoiles à n'importe quelle distance du centre d'une galaxie et la quantité de matière noire dans ce rayon qui serait déduite dans une analyse newtonienne, une prédiction vérifiée par observation.

---

[125] M. Milgrom, « A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis », *The Astrophysical Journal* 270 (juillet 1983): 371–389, https://doi.org/10.1086/161130.

[126] Stacy S. McGaugh, « A tale of two paradigms: the mutual incommensurability of ΛCDM and MOND », *Canadian Journal of Physics* 93, nº 2 (21 avril 2014): 250–259, https://doi.org/10.1139/cjp-2014-0203.

[127] Pavel Kroupa, *The vast polar structures around the Milky Way and Andromeda*, 2013, https://www.youtube.com/watch?v=UPVGDXNSBZM.

[128] Benoit Famaey et Stacy McGaugh, « Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions », *Living Reviews in Relativity* 15, nº 1 (décembre 2012): 10, https://doi.org/10.12942/lrr-2012-10.

[129] Mordehai Milgrom, « MOND laws of galactic dynamics », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 437, nº 3 (21 janvier 2014): 2531-41, https://doi.org/10.1093/mnras/stt2066.

- Confirme la stabilité des galaxies à disques pour les régions des galaxies dans le régime MOND profond.
- Pour les galaxies particulièrement massives, MOND prévoit que la courbe de rotation devrait diminuer de 1/r, selon la loi de Kepler, confirmée par les observations de galaxies elliptiques de grandes masses.

À partir de la théorie initiale de MOND, un certain nombre de théories concurrentes ont été bifurquées qui sont basées sur le même noyau dur (heuristique négative) mais avec différentes stratégies de développement (heuristique positive) :

- AQUAL a été développé en 1984 par Milgrom et Jacob Bekenstein, [130] générant un comportement MOND en modifiant le terme gravitationnel dans le lagrangien classique.
- QUMOND[131] a introduit une distinction entre le champ d'accélération MOND et le champ d'accélération newtonien.
- TeVeS part du comportement du MOND mais considère un cadre relativiste. TeVeS a réussi à observer les lentilles gravitationnelles et la formation de structures, mais ne parvient pas à expliquer d'autres aspects cosmologiques. [132]

Il existe aussi d'autres généralisations relativistes alternatives du MOND, comme BIMOND et les théories généralisées d'Einstein. [133]

L'effet de champ externe implique une rupture fondamentale de MOND du principe d'équivalence fort (mais pas nécessairement par le principe d'équivalence faible), ce qui est reconnu comme un élément crucial du paradigme MOND.

Les partisans de la théorie MOND ont proposé plusieurs tests d'observation et expérimentaux pour aider à établir la théorie la mieux corroborèe entre les modèles MOND[134] et la matière noire, tels que: l'existence d'accélérations anormales sur Terre qui pourraient être détectées

---

[130] J. Bekenstein et M. Milgrom, « Does the Missing Mass Problem Signal the Breakdown of Newtonian Gravity? », *The Astrophysical Journal* 286 (novembre 1984): 7-14, https://doi.org/10.1086/162570.

[131] Mordehai Milgrom, « Quasi-linear formulation of MOND », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403, nº 2 (4 février 2010): 886-95, https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16184.x.

[132] Jacob D. Bekenstein, « Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm », *Physical Review D* 71, nº 6 (14 mars 2005): 069901, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.069901.

[133] Famaey et McGaugh, « Modified Newtonian Dynamics (MOND) ».

[134] John F. Wallin, David S. Dixon, et Gary L. Page, « Testing Gravity in the Outer Solar System: Results from Trans-Neptunian Objects », *The Astrophysical Journal* 666, nº 2 (10 septembre 2007): 1296–1302, https://doi.org/10.1086/520528.

dans une expérience de précision; [135] tests dans le système solaire en utilisant la mission LISA Pathfinder en observant les marées prédites par le MOND et un point Soleil-Terre de potentiel gravitationnel newtonien[136]; mesurer les corrections MOND à la précession du périhélie des planètes du système solaire[137]; un test astrophysique pour étudier le comportement des galaxies isolées et le comportement non newtonien dans les systèmes d'étoiles binaires; tests utilisant la dépendance au décalage vers le rouge de l'accélération radiale. [138]

La « cinquième force » est une théorie qui modifie la loi de Newton de la gravité universelle. Les premières expériences ont donné des résultats contradictoires : l'un a affirmé l'existence de la cinquième force, tandis que l'autre a contredit cette théorie. Après de nombreuses répétitions de l'expérience, la discorde a été résolue et le consensus a été atteint que la Cinquième Force n'existe pas. [139]

1.3 Tests des théories post-newtoniennes

1.3.1 Tests proposés par Newton

Dans la première édition du *Principia*, Newton considérait que des expériences avec le pendule lui permettraient de déchiffrer les différents types de force de résistance et leur variation avec la vitesse. Il reconnaît l'échec de ces expériences, dans les deuxième et troisième éditions, puis fait appel à la chute verticale d'objets aux forces de résistance dues à l'inertie de l'environnement. Son intention était d'approcher les autres types en utilisant les différences entre les observations et cette loi. [140] Mais cette approche était également erronée, car il n'y a pas d'espèce distincte de force de

---

[135] V. A. De Lorenci, M. Faundez-Abans, et J. P. Pereira, « Testing the Newton second law in the regime of small accelerations », *Astronomy & Astrophysics* 503, nº 1 (août 2009): L1-4, https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811520.

[136] Christian Trenkel et al., « Testing MOND/TEVES with LISA Pathfinder », *arXiv:1001.1303 [astro-ph]*, 8 janvier 2010, http://arxiv.org/abs/1001.1303.

[137] Luc Blanchet et Jerome Novak, « Testing MOND in the Solar System », *arXiv:1105.5815 [astro-ph, physics:gr-qc]*, 29 mai 2011, http://arxiv.org/abs/1105.5815.

[138] Sabine Hossenfelder et Tobias Mistele, « The Redshift-Dependence of Radial Acceleration: Modified Gravity versus Particle Dark Matter », *International Journal of Modern Physics D* 27, nº 14 (octobre 2018): 1847010, https://doi.org/10.1142/S0218271818470107.

[139] Michele Cicoli, Francisco G. Pedro, et Gianmassimo Tasinato, « Natural Quintessence in String Theory », *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, nº 07 (23 juillet 2012): 044-044, https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/044.

[140] Newton, « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. », 749.

résistance, mais seulement le résultat de l'interaction avec l'environnement inertiel et visqueux. Cette interaction étant très complexe, Newton n'a pas pu déduire une loi pour la force de résistance, elle n'a déterminé que des relations empiriques pour des corps de formes différentes. [141]

Newton soutient dans la loi de la gravité la stricte proportionnalité de la « quantité de matière » avec le poids, mais les expériences avec le pendule indiquent seulement que la masse inertielle est proportionnelle au poids. [142] La masse d'un objet en est une caractéristique intrinsèque, tandis que le poids est une caractéristique extrinsèque, en fonction des champs gravitationnels générés par d'autres objets. Les expériences avec le pendule sont décrites en détail dans le Livre III, Proposition 6, où Newton déclare : « Tous les corps gravitent vers chacune des planètes et, à n'importe quelle distance donnée du centre d'une planète, le poids de tout corps, quelle que soit la planète, est proportionnel à la quantité de la matière que contient le corps » [143], puis décrit ses expériences. [144]

Newton affirme, en contradiction avec la vision cartésienne, que chacune des propriétés universelles et essentielles de la matière - à savoir l'extension, la mobilité, la dureté, l'impénétrabilité et la masse - n'est connue « que par les sens ». Mais de son affirmation selon laquelle les propriétés de la matière ne sont connues que « par des expériences », il s'ensuit que Newton n'accepte pas une vision naïve-empirique, mais plutôt une double conception sophistiquée de l'épistémologie de la matière, [145] niant la vision cartésienne selon laquelle nous ne pouvons déterminer les propriétés universelles de la matière que *a priori* ou uniquement par la raison, et en faisant valoir que des expériences conceptuellement guidées en théorie physique sont nécessaires pour déterminer les propriétés de la matière: « Cette [masse] peut toujours être connue à partir du poids d'un corps, car - en faisant des expériences très précises avec des pendules - nous avons constaté qu'il est proportionnel au poids. » [146] Le concept de matière de Newton impliquait un rejet fondamental de la philosophie mécaniste. Les expériences avec le pendule sont également décrites dans la Proposition 24 du Livre 2, dans les Corollaires cinq et sept.

Dans les expériences avec le pendule, comparant le nombre d'oscillations des billes du pendule solide et du pendule vide, Newtom a essayé de déterminer comment un éther qui agit non seulement à la surface d'un corps mais aussi sur ses parties internes, affecte ces pendules. C'est ainsi que

---

[141] L. D. Landau et E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics: Volume 6*, 2 edition (Amsterdam u.a: Butterworth-Heinemann, 1987), 31-36, 168-79.

[142] Newton, « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. », 701, 806-9.

[143] Newton, 806.

[144] Newton, 806-7.

[145] Janiak, *Newton as Philosopher*.

[146] Newton, « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. », 404.

Newton a fini par croire qu'il n'y avait pas d'éther et il a favorisé l'idée, dans la Préface de *Principia*, de l'universalité de la gravité. [147]

Pour discuter des effets qui distinguent le mouvement absolu du mouvement relatif, Newton utilise l'expérience de pensée de « **seau d'eau** » décrite dans un paragraphe sur « les effets qui distinguent le mouvement absolu du mouvement relatif ». Newton déclare ici que « le mouvement circulaire vrai et absolu de l'eau ... peut être mesuré par ce test. » [148] Accrochez un seau d'eau avec une corde et tournez le seau dans une direction ; puis laissez la corde récupérer. Le seau tourne maintenant et la surface de l'eau sera initialement plate, mais par rapport au seau, il tourne. En frottant avec le seau rotatif, l'eau commence progressivement à tourner également, équilibrant éventuellement la vitesse du seau de sorte que le mouvement vers le seau atteigne progressivement zéro. Mais, à mesure que la rotation relative de l'eau par rapport au seau diminue, « son effort pour se retirer de l'axe de mouvement » augmente en conséquence. Newton observe que l'accélération (par exemple, la rotation) est détectable empiriquement par la présence d'effets inertiels, même en l'absence de changement dans les relations d'objet. Newton soutient également, contrairement à Descartes, que nous ne pouvons pas comprendre le véritable mouvement de l'eau dans le seau comme un changement dans la relation entre l'eau et le corps environnant (dans ce cas, le seau). La relation entre l'eau et le seau reste la même, malgré le fait que l'eau ait un réel mouvement, comme l'indique la présence d'effets inertiels. Le véritable mouvement d'un corps ne peut donc pas être compris en termes de changements dans ses relations avec d'autres objets. L'espace absolu nous permet de capturer ce qui est le vrai mouvement, selon Newton. [149]

Pour Newton, il semble que la force centrifuge soit le critère et la mesure de la rotation absolue. Il définit la rotation absolue comme produisant un tel effet, critiquant la définition de Descartes du « mouvement au sens philosophique » comme un mouvement d'un corps par rapport aux corps voisins. L'expérience montre que l'effet dynamique est indépendant du mouvement relatif entre l'eau et le seau. [150] Newton démontre enfin que, parce qu'elle dépend de forces physiques identifiables, sa définition peut être appliquée de manière cohérente même en l'absence des corps de référence observables, car si deux corps reliés par un cordon sont seuls dans un univers par ailleurs vide, la tension sur câble offre toujours un critère et une mesure de la quantité de véritable mouvement circulaire. [151]

---

[147] Newton, 382-83.

[148] Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*, 21.

[149] Janiak, *Newton as Philosopher*.

[150] Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*, 21.

[151] Newton, 22.

Une autre expérience de pensée newtonienne a impliqué **deux corps reliés par une corde**, [152] qui tournent autour de leur centre de poids commun, en l'absence d'autres corps pouvant influencer leurs mouvements. « L'effort de retrait de l'axe de mouvement pourrait être connu à partir de la tension du cordon, et donc la quantité de mouvement circulaire pourrait être calculée. » Respectivement, la rotation absolue d'un corps est non seulement indépendante de sa rotation par rapport aux corps contigus, mais est indépendante de toute rotation relative.

Selon Ernst Mach, deux cents ans après Newton, si Newton négligeait les corps voisins, il référait tous les mouvements à des « étoiles fixes ». Mais si nous pouvons déduire des lois de Newton comment les corps se comporteront en l'absence d'étoiles fixes, nous ne pouvons pas déduire si, dans ces circonstances, ils resteront de toute façon valables. Pour Einstein, sous l'influence de Mach, l'argument de Newton illustre le « défaut épistémologique » inhérent à la physique newtonienne. [153]

Dans les Propositions 26-29, Livre 3, du *Principia* de 1687, [154] Newton a développé un traitement spécial de l'influence de la force gravitationnelle du Soleil sur le **mouvement de la Lune** autour de la Terre. Tycho Brahe avait découvert une variation bimestrielle de la vitesse lunaire après la disparition d'une éclipse lunaire attendue. Remarquablement, Newton n'a pas pris en compte le mouvement réel de la Lune, qui est connu pour être approximé par le modèle d'Horrocks d'une ellipse de précession avec la Terre dans une seule foyer. Il a considéré un modèle idéalisé dans lequel la Lune tourne en orbite circulaire autour de la Terre en l'absence de perturbation solaire. Il a calculé le changement d'orbite dû à cette perturbation et a obtenu des résultats qui étaient conformes à l'observation de Brahe. Ce fut l'un des grands triomphes de la théorie gravitationnelle de Newton, développée par Euler[155] et G. Hill[156].

La théorie de Newton a eu le plus grand succès lorsqu'elle a été utilisée pour prédire l'existence de **Neptune** basée sur les mouvements d'Uranus, ce qui ne pouvait pas être expliqué par les actions d'autres planètes. Les calculs de John Couch Adams et Urbain Le Verrier ont prédit la position

[152] Cohen et Smith, *The Cambridge Companion to Newton*, 44.

[153] Cohen et Smith, *The Cambridge Companion to Newton*.

[154] Newton, « Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed. »

[155] Leonhard Euler, *Sol et Luna I: Opera Mechanica Et Astronomica Vol 23*, éd. par Otto Fleckenstein, 1956 edition (Basileae: Birkhäuser, 1956), 286–289.

[156] G. W. Hill, « The Collected Mathematical Works of G. W. Hill », *Nature* 75, nº 1936 (décembre 1906): 284–335, https://doi.org/10.1038/075123a0.

générale de la planète, et les calculs de Le Verrier ont conduit Johann Gottfried Galle à la découverte de Neptune. [157]

La théorie de la gravité de Newton est meilleure que la théorie de Descartes parce que la théorie de Descartes a été réfutée (avérée fausse) pour expliquer le mouvement des planètes. La théorie de Newton a été à son tour réfutée par le périhélie anormal de Mercure. Même si les ellipses képlériennes rejetaient la théorie cartésienne du tourbillonnement, seule la théorie de Newton nous obligeait à la rejeter ; et même si le périhélie de Mercure a rejeté la gravité newtonienne, seule la théorie d'Einstein nous a fait la rejeter. Un refus indique simplement l'urgence de réviser la théorie actuelle, mais ce n'est pas une raison suffisante pour éliminer la théorie.

1.3.2 Tests des théories post-newtoniennes

Habituellement, le « laboratoire » des tests gravitationnels était les corps célestes, les systèmes astrophysiques. Mais ces tests sont perturbés par des effets non gravitationnels. Le « laboratoire » le plus utilisé était le système solaire. Récemment, les scientifiques se sont concentrés sur l'observation des pulsars binaires pour la vérification des théories gravitationnelles, en observant les variations de la période orbitale, fournissant ainsi des preuves indirectes de l'émission de rayonnement gravitationnel.

Mais l'expérimentateur ne peut pas « organiser le laboratoire » selon ses besoins, ni déclencher certains événements quand il en a besoin. Mais le développement technologique actuel commence à permettre de pures expériences de laboratoire. Ainsi, des détecteurs résonants (oscillateurs harmoniques) avec des niveaux de dissipation très faibles ont été atteints. Dans ces tests de laboratoire, un type d'expériences est celui pour vérifier les effets gravitationnels post-newtoniens. A cet effet, une masse de dimensions de laboratoire est déplacée (par rotation ou vibration) de manière à produire à son voisinage un « champ gravitationnel post-newtonien » (champs gravitationnels de type newtonien produits par l'énergie cinétique ou de pression). Le mouvement de la masse est modulé de sorte que le signal post-newtonien souhaité entraîne de manière résonnante les oscillations du détecteur et l'expérimentateur surveille les changements entraînant le mouvement du détecteur. [158]

Grâce à ces expériences, seuls certains types d'effets post-newtoniens peuvent être examinés. Certains effets post-newtoniens (tels que les effets gravitationnels non linéaires) sont complètement négligeables. Mais il est possible de vérifier les influences gravitationnelles de la vitesse et de la

---

[157] John Couch Adams, « On the Perturbations of Uranus (1841-1846). | StJohns », 1846, 265, https://www.joh.cam.ac.uk/w16-manuscripts-john-couch-adams-perturbations-uranus-1841-1846.

[158] Carlton Morris Caves, « Theoretical investigations of experimental gravitation » (phd, California Institute of Technology, 1979), http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898.

pression. Dans ces expériences post-newtoniennes, on tente d'éliminer le « bruit newtonien », les effets de champ gravitationnel newtonien de la source de laboratoire qui sont beaucoup plus importants que les effets post-newtoniens les plus importants.

1.4 Anomalies de la gravité newtoniennes

La loi de gravité de Newton est suffisamment précise pour des raisons pratiques. Les écarts sont faibles lorsque les grandeurs dimensionnelles $\varphi/c^2 << 1$ et $(v/c)^2 << 1$, où φ est le potentiel gravitationnel, v est la vitesse des objets étudiés et c est la vitesse de la lumière. [159] Sinon, la relativité générale doit être utilisée pour décrire le système. La loi de gravité de Newton est la limite gravitationnelle de la relativité générale dans les conditions spécifiées ci-dessus.

En ce qui concerne la loi de Newton, il existe toujours des préoccupations théoriques actuelles: il n'y a toujours pas de consensus concernant la médiation de l'interaction gravitationnelle (qu'il y ait ou non action à distance). De plus, la théorie de Newton implique une propagation instantanée de l'interaction gravitationnelle, sinon une instabilité des orbites planétaires apparaîtrait.

La théorie de Newton ne pouvait pas expliquer la précession exacte de l'orbite des planètes, en particulier pour Mercure, qui a été détectée longtemps après la mort de Newton. [160] La différence de 43 secondes d'arc par siècle ressort des observations des autres planètes et de la précession observée avec les télescopes avancés au XIXe siècle.

La déviation angulaire des rayons lumineux due à la gravité, calculée selon la théorie de Newton, est la moitié de la déviation observée par les astronomes. La relativité générale prédit des valeurs beaucoup plus proches des valeurs d'observation.

Dans les galaxies spirales, l'orbite des étoiles autour de leur centre ne semble pas exactement respecter la loi de gravité universelle de Newton. Les astrophysiciens ont introduit quelques hypothèses *ad hoc* pour concilier ce phénomène avec les lois de Newton, en supposant l'existence de grandes quantités de matière noire.

Newton lui-même n'était pas à l'aise avec le concept d ‘ « action à distance » que ses équations impliquaient. En 1692, dans sa troisième lettre à Bentley, il écrivait : « Un corps qui peut agir sur un autre à distance, dans le vide, sans médiation, par et à travers lequel leur action et leur force peuvent être transmises les unes après les autres, c'est une telle absurdité pour moi que, je pense,

---

[159] Charles W. Misner, Kip S. Thorne, et John Archibald Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman, 1973), 1049.

[160] Max Born, *Einstein's Theory of Relativity*, Revised edition edition (New York: Dover Publications Inc., 1962), 348.

aucun homme doté d'une capacité philosophique de pensée compétente ne pourrait y croire. » [161] [162]

Newton n'a pas réussi à émettre une théorie phénoménologique, à confirmer expérimentalement, sur la façon dont agit la gravité, bien qu'il ait suggéré deux hypothèses mécaniques en 1675 et 1717. Dans le Scholium général de la deuxième édition du *Principia* de 1713, il a dit : « Je n'ai pas encore pu découvrir la cause des phénomènes de ces propriétés de gravité et je ne devine pas d'hypothèses ... Il suffit que la gravité existe vraiment et qu'elle agisse selon les lois que j'ai expliquées et qu'elle contribue pleinement à expliquer tous les mouvements des corps céleste ». [163]

1.5 Point de saturation de la gravité newtonienne

À la fin du 20e siècle et au début du 21e siècle, les contradictions entre la mécanique newtonienne et l'électrodynamique de Maxwell (entre l'invariance galiléenne et l'idée de la vitesse constante de la lumière) sont devenues évidentes. Une solution initialement proposée était le concept de l'éther. Einstein a rejeté cette solution, interprétant les théories de Newton et Maxwell comme si fondamentales, chacune avec son modèle rival, que la seule solution était le développement d'une nouvelle théorie unificatrice, avec un autre noyau dur et une heuristique positive spécifique : la relativité restreinte.

Nicholas Maxwell[164] discute six écarts dans la mécanique newtonienne mis en évidence par Einstein[165] (qui pourraient être appelés anomalies dans le programme de Lakatos), à savoir :

1. L'arbitraire des référentiels inertiels et le concept d'espace absolu
2. Deux lois fondamentales distinctes, (a) la loi du mouvement ($F = ma$) et (b) l'expression de la force gravitationnelle ($F = Gm_1m_2/d^2$)
3. L'arbitraire de (b) étant donné (a), il existe un nombre infini de possibilités aussi bonnes pour (b)
4. La possibilité que la loi de la force soit déterminée par la structure de l'espace et l'incapacité d'exploiter cette possibilité
5. Le caractère ad hoc de l'égalité de la masse inertielle avec celle gravitationnelle ; et

---

[161] I. Bernard Cohen, « Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents », *Philosophy of Science* 27, nº 2 (1960): 209–211.

[162] Sfetcu, *Isaac Newton despre acțiunea la distanță în gravitație - Cu sau fără Dumnezeu?*

[163] Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*

[164] Nicholas Maxwell, « The Need for a Revolution in the Philosophy of Science », *Journal for General Philosophy of Science* 33, nº 2 (1 décembre 2002): 381-408, https://doi.org/10.1023/A:1022480009733.

[165] Albert Einstein, « Autobiographische Skizze », in *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, éd. par Carl Seelig (Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956), 27-31, https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2.

6. La nature non naturelle de l'énergie divisée en deux formes, cinétique et potentielle.

Einstein explique pourquoi les tentatives de résolution d'anomalies par des hypothèses *ad-hoc* échouent, et conclut : « En conséquence, la révolution amorcée par l'introduction du champ n'a pas été achevée. Puis, au début du siècle, une deuxième crise fondamentale s'est produite... », la crise générée par les débuts de la théorie quantique, la première étant le dualisme particules/champs en physique classique. [166]

De plus, le programme classique de Lorentz était progressif jusqu'en 1905 - l'année où Einstein publia sa théorie de la relativité restreinte.

Nugayev affirme que le programme de recherche soutenu par Einstein était beaucoup plus large, comprenant la relativité, la théorie quantique et la mécanique statistique, pour l'unification de la mécanique et de l'électrodynamique. [167]

La plupart des explications de la victoire d'Einstein sur les recherches de Lorentz se réfèrent à l'expérience de Michelson-Morley. [168] Elie Zahar[169], basé sur la méthodologie de Lakatos[170], déclare que les théories d'éthér de Lorentz et les théories spéciales et générales d'Einstein de la relativité ont été développées dans différents programmes concurrents. Selon Zahar, le programme de Lorentz n'a été remplacé par le programme de relativité d'Einstein qu'en 1915 en expliquant la précession du périhélie de Mercure. Ce n'est qu'avec le développement de la relativité générale le programme d'Einstein a prédit des observations qui ne pouvaient pas être dérivées de celles de Lorentz. [171]

Nugayev, argumentant contre l'extension par Zahar de la méthodologie de Lakatos, a eu l'intention d'expliquer le succès du programme de recherche d'Einstein sur Lorentz par une extension différente de la méthodologie de Lakatos, y compris les différentes proposées par moi. Ainsi, pour deux théories différentes essayant d'expliquer les mêmes données expérimentales, le processus d'application conjointe des deux théories pour résoudre un problème sera appelé « croix », tandis qu'elles seront appelées « théories croisées ». L'ensemble des énoncés décrivant les relations entre

[166] Einstein, 27-31.

[167] R. M. Nugayev, « The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz », *Philosophy of Science* 52, nº 1 (1985): 44–63.

[168] Gerald Holton, « Einstein, Michelson, and the “Crucial” Experiment », *Isis: A Journal of the History of Science* 60 (1969): 132-97.

[169] Zahar, « Why Did Einstein’s Programme Supersede Lorentz’s? »

[170] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*.

[171] Nugayev, « The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz ».

les croisements sera appelé « théorie croisée ». [172] Nugayev aborde également l'idée d'une théorie que j'ai appelée « unificatrice » lorsque les théories traversent des « contradictions croisées ». Nugayev appelle la nouvelle théorie « globale ». Selon lui, il y aurait deux façons logiques d'élaborer la théorie globale : « réductionniste » et « synthétique ».

Nugayev déclare que les noyaux durs de Lakatos sont obtenus par convention. Je ne suis pas d'accord avec lui ici. Le noyau dur est établi par l'initiateur du programme de recherche qui établit également la stratégie de développement du programme en fonction de l'heuristique négative. Le noyau dur est ce qu'il veut rester inébranlable, étant absolument convaincu qu'il a raison. Quand il changera le noyau dur, il abandonnera pratiquement ce programme de recherche et commencera un autre programme.

---

[172] Nugayev.

2. Relativité générale

Les premières interprétations philosophiques de la théorie de la relativité générale (RG) sont très diverses, chacune essayant d'identifier Einstein comme un adepte de cette philosophie. Les partisans de Mach ont souligné la tentative d'Einstein de mettre en œuvre une « relativisation de l'inertie » dans la théorie générale, et son approche opérationnaliste de la simultanéité. Les kantiens et les néo-kantiens ont montré l'importance des « formes intellectuelles » synthétiques dans la théorie générale, en particulier le principe de covariance générale. Les empiristes logiques ont mis l'accent sur la méthodologie de la théorie, les conventions pour exprimer le contenu empirique.

Bertrand Russell a noté que[173]

> « Il y avait une tendance, pas inhabituelle dans le cas d'une nouvelle théorie scientifique, pour chaque philosophe à interpréter le travail d'Einstein selon son propre système métaphysique, et à suggérer que le résultat est une grande adhésion de pouvoir aux vues que le philosophe a déjà exprimées. Cela ne peut pas être vrai dans tous les cas, et on peut espérer que ce n'est vrai dans aucun. Il serait décevant qu'un changement fondamental tel qu'introduit par Einstein n'implique aucune nouveauté philosophique. »[174]

La plupart des premiers travaux d'Einstein révèlent qu'il est un partisan de Ludwig Boltzmann, plutôt que d'Ernst Mach, dans le débat sur l'atomisme.[175] Cependant, en 1912, le nom d'Einstein a été affiché parmi ceux qui ont rejoint Mach dans un appel à former une « Société pour la philosophie positiviste. » À la fin de sa vie[176], Einstein a écrit sur « l'influence profonde » exercée sur lui par l'École de mécanique de Mach et sur la très grande influence pendant sa jeunesse de la « position épistémologique de Mach ». Les déclarations épistémologiques et méthodologiques occasionnelles semblent indiquer un accord avec les parties essentielles de la doctrine positiviste de Mach.[177] L'idée de Mach selon laquelle la masse et le mouvement inertiel du corps résultent de

[173] Thomas A. Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Spring 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/genrel-early/.

[174] Bertrand Russell, *Relativity: Philosophical Consequences, in Encyclopaedia Britannica: Thirteenth Edition Volume 31* (ENCYCLOPAEDIA BRITTANICA PRESS, 1926), 331.

[175] Thomas Ryckman, *Einstein*, 1 edition (London ; New York: Routledge, 2011), chap. 3.

[176] Einstein, « Autobiographische Skizze », 21.

[177] Albert Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, 23. Aufl. 2001. Nachdruck (Berlin: Springer, 2002).

l'influence de toutes les autres masses environnantes était probablement la motivation la plus forte pour développer une théorie relativiste de la gravité. [178]

Un passage de la première exposition complète d'Einstein a montré que son exigence générale de covariance pour les équations du champ gravitationnel (ce qui signifie qu'elles restent inchangées sous la transformation arbitraire, mais continuellement adéquate, des coordonnées de l'espace-temps), « éloigne de l'espace et du temps le dernier vestige de l'objectivité physique ». Josef Petzoldt, un philosophe machien, a noté que Einstein est mieux caractérisé comme un positiviste relativiste. [179] La philosophie contemporaine a montré que les remarques d'Einstein n'étaient que des références elliptiques à un « argument de trou », selon lequel si une théorie est en général covariant, les points vides de la manifestation espace-temps ne peuvent pas avoir une identité primitive inhérente, et donc pas de réalité indépendante. [180] Donc pour une théorie covariante générale, aucune réalité physique ne s'accumule dans « l'espace vide » en l'absence des champs physiques, idée qui ce n'est pas un soutien au phénoménalisme positiviste.

La relativisation de tous les effets inertiels (« principe de Mach »), ainsi que le principe de relativité générale interprété par Einstein comme le principe de covariance générale, et avec le principe d'équivalence, ont été considérés par Einstein comme les trois principes piliers sur lesquels sa théorie était fondée.

Les portraits rétrospectifs de la méthodologie d'Einstein dans la genèse de la relativité générale se concentrent sur l'idée d'une stratégie qui prend en compte l'esthétique mathématique. [181] Les positivistes et les opérationnalistes argumentaient avec l'analyse d'Einstein de la simultanéité comme élément méthodologique fondamental de la théorie de la relativité.

Les philosophes kantiens n'ont pas accordé beaucoup d'attention à la théorie de la relativité. Cassirer a vu la théorie générale de la relativité comme une confirmation des principes fondamentaux de

---

[178] Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

[179] Joseph Petzoldt, Giora Hon, et Ernst Mach, *Der Verhältnis der Machschen Gedankenwelt zur Relativitätstheorie, an appendix to Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt* (Xenomoi Verlag, 1921), 516.

[180] John D. Norton, « General Covariance and the Foundations of General Relativity: Eight Decades of Dispute », *Reports of Progress in Physics* 56 (1993): 791–858.

[181] Thomas Ryckman, « A Believing Rationalist », The Cambridge Companion to Einstein, mai 2014, 377-420, https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.014.

l'idéalisme transcendantal. [182] Natorp[183] a apprécié le principe de la relativité comme étant compatible avec le kantianisme en distinguant les concepts transcendantaux idéaux et purement mathématiques de l'espace et du temps et leurs mesures physiques relatives. De cette relativisation, dit Natorp, il s'ensuit que « les événements sont ordonnés non pas par rapport au temps absolu, mais seulement comme des phénomènes déterminés dans la relation réciproque temporelle, une version du relationnalisme leibnizien. »[184] De plus, la constance de la vitesse de la lumière, considérée comme un présupposé empirique, « a rappelé que les déterminations absolues de ces mesures, qui ne peuvent être atteintes en science naturelle empirique, exigeraient une obligation absolue correspondante. » [185] Natorp a considéré l'exigence d'invariante des lois de la nature concernant les transformations de Lorentz comme « peut-être le résultat le plus important de l'enquête de Minkowski. » [186]

Un certain nombre de positions néo-kantiennes, y compris celles de Marburg et Bollert, [187] ont soutenu que la théorie de la relativité a clarifié la position kantienne dans l'esthétique transcendantale en montrant que ce n'est pas l'espace et le temps, mais la spatialité (déterminisme dans l'ordre positionnel) et la temporalité (dans l'ordre de succession) qui sont *a priori* des conditions de connaissance physique. Cette révision des conditions d'objectivité est essentielle à l'idéalisme critique.

L'interprétation néo-kantienne la plus influente de la relativité générale a été *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*[188] d'Ernst Cassirer, dans laquelle la théorie est considérée comme un test crucial pour *Erkenntniskritik* (l'épistémologie des sciences physiques de l'idéalisme transcendantal de Marburg). Reconnaissant l'exigence d'une covariance générale, Cassirer a déclaré que la théorie générale de la relativité, avec les coordonnées de l'espace et du temps, ne représente que des symboles d'événements (« coïncidences »), des variables indépendantes de fonctions mathématiques (champ) qui caractérisent physiquement l'ampleur de l'état. [189] La covariance

[182] Ernst Cassirer, W. C. Swabey, et M. C. Swabey, *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity* (Courier Corporation, 2003), 172-73.

[183] Paul Natorp, *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften* (Sändig Reprint, H. R. Wohlwend, 1910), 399-404.

[184] Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

[185] Ryckman.

[186] Natorp, *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*, 403.

[187] Karl Bollert, *Einstein's Relativitätstheorie und ihre Stellung im System der Gesamterfahrung* (T. Steinkopf, 1921).

[188] Ernst Cassirer, *Zur Einstein'schen relativitätstheorie: Erkenntnistheoretische betrachtungen* (B. Cassirer, 1921), 1-125.

[189] Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

générale serait l'affinement le plus récent du principe méthodologique de l '« unité de détermination » qui détermine les connaissances physiques en passant des concepts de substance aux concepts fonctionnels et relationnels. Cassirer a conclu que la théorie générale de la relativité présente « l'application et la réalisation les plus déterminées dans la science empirique de la position de l'idéalisme critique ». [190]

E. Sellien[191] a déclaré que les vues de Kant sur l'espace et le temps ne se réfèrent qu'à l'espace intuitif et étaient donc imperméables à l'espace et au temps mesurables de la théorie empirique d'Einstein.

L'empirisme logique de la philosophie des sciences a émergé principalement du fait des deux théories de la relativité d'Einstein, favorisant le conventionnalisme à la Poincaré plutôt que le néo-kantianisme et le positivisme machien. On considère que la philosophie de l'empirisme logique de la science elle-même s'est formée à partir des leçons tirées de la théorie de la relativité. Certaines des doctrines les plus caractéristiques de cette philosophie (interprétant les éléments *a priori* des théories physiques comme des conventions, traitant du rôle nécessaire des conventions dans le développement de concepts théoriques à partir de l'observation, insistant sur le langage observationnel dans la définition des termes théoriques) ont été utilisées par Einstein pour modéliser ces deux théories de la relativité. [192]

Reichenbach a développé la thèse de « la relativité de la géométrie », selon laquelle une géométrie arbitraire pour l'espace-temps peut être développée si les lois de la physique sont modifiées en conséquence par l'introduction de « forces universelles ». Mais le premier travail de Reichenbach sur la relativité a été écrit dans une perspective néo-kantienne. [193] Selon Friedman[194] et Ryckman, [195] Reichenbach a modifié la conception kantienne des principes synthétiques *a priori*, rejetant le sens « valable pour tous les temps », tout en conservant « le constituant de l'objet de la connaissance », aboutissant à une théorie spécifique « *a priori* relativisée ». Ainsi, une transformation apparaît dans la méthode de recherche épistémologique de la science par laquelle la « méthode d'analyse de la science » est proposée comme « la seule façon qui nous permette de comprendre la contribution

---

[190] Cassirer, Swabey, et Swabey, *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity*, 412.

[191] Ewald Sellien, *Die erkenntnistheoretische Bedeutung der Relativitätstheorie* (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1919).

[192] Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

[193] Hans Reichenbach, *Relativitätstheorie Und Erkenntnis Apriori* (J. Springer, 1920).

[194] Michael Friedman, « Geometry, Convention, and the Relativized A Priori: Reichenbach, Schlick, and Carnap », Reconsidering Logical Positivism, juillet 1999, 21-34, https://doi.org/10.1017/CBO9781139173193.006.

[195] Thomas Ryckman, *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*, 1 edition (Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005).

de notre raison à la connaissance ». [196] La méthodologie de rationalisation implique la distinction claire entre le rôle subjectif des principes et l'apport de la réalité objective. La théorie de la relativité est un brillant exemple de cette méthode car elle a montré que la métrique espace-temps décrit une « propriété objective » du monde, une fois que la liberté subjective de transformation des coordonnées (le principe de coordination de la covariance générale) est reconnue. [197] [198]

Einstein, dans une conférence de janvier 1921 intitulée « Géométrie et expérience », a soutenu que la question de la nature de la géométrie spatio-temporelle n'est un problème empirique que par rapport à certaines stipulations. La conception conventionnelle de Reichenbach a atteint sa maturité en 1922. Reichenbach a soutenu que les problèmes concernant la détermination empirique de la métrique espace-temps doivent tenir compte du fait que la géométrie et la physique soutiennent le test d'observation, ce qui est le cas en relativité générale d'Einstein (la méthode de Reichenbach a été appelée « l'analyse logique de la science ».) Ainsi, la détermination empirique de la métrique espace-temps par mesure nécessite le choix « d'indicateurs métriques » en établissant une définition de coordination. Einstein, en collaboration avec Schlick et Reichenbach, a développé une nouvelle forme d'empirisme, appropriée pour argumenter la relativité générale contre la critique néo-kantienne. [199] [200]

Einstein a mis en œuvre une conception relationnelle ou relativiste du mouvement, conformément à l'attitude relationnelle de Leibniz envers l'espace et le temps et contrairement à l'attitude absolutiste de Newton. Par cela, des contraintes sont imposées à l'ontologie des théories de l'espace-temps, limitant le champ dans lequel les quantificateurs des théories sont situés à l'ensemble des événements physiques, c'est-à-dire dans l'ensemble des points de l'espace-temps qui sont réellement occupés par des objets ou processus matériels.[201] Le relationnisme reichenbachien, en revanche, imposent des contraintes à l'idéologie des théories spatio-temporelles, limitant le vocabulaire à un certain ensemble de prédicats préférés, tels que les prédicats définis en termes de relations « causales ».

Le conventionnalisme, comme le relationnel, est sceptique quant aux structures postulées par les théories de l'espace-temps. Elle pose le problème des propriétés géométriques (métriques) et des relations définies dans ce domaine. Friedman affirme que le conventionnalisme est étroitement lié au relationnalisme idéologique. Le conventionnalisme de base fait valoir que certains systèmes de

---

[196] Reichenbach, *Relativitätstheorie Und Erkenntnis Apriori*, 74.

[197] Reichenbach, 90.

[198] Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

[199] Moritz Schlick, « Kritizistische Oder Empiristische Deutung der Neuen Physik? », *Société Française de Philosophie, Bulletin* 26, nº n/a (1921): 96.

[200] Hans Reichenbach, *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, 1 Plate (De Gruyter, 1928).

[201] Friedman, *Foundations of Space-Time Theories*.

description incompatibles à première vue, tels que les géométries euclidiennes et non euclidiennes, sont en fait des « descriptions équivalentes » des mêmes faits, les deux pouvant être vrais par rapport aux diverses « définitions de coordination » choisies arbitrairement. Cela représente un problème épistémologique dans le choix entre des théories concurrentes, entraînant un problème de sous-détermination théorique. Ainsi, Friedman affirme que la théorie de la relativité semble reposer sur une conception de « descriptions équivalentes » dérivée directement de la stratégie conventionnaliste. [202] Le développement de la théorie de la relativité est basé sur une méthodologie du point de vue du processus d'unification théorique.

Une décennie après l'émergence de la théorie générale de la relativité, on parlait d'une réduction de la physique à la géométrie, [203] conduisant à des problèmes philosophiques distincts, de méthodologie mais aussi d'épistémologie et de métaphysique, ainsi que des problèmes techniques. Cette réduction implicite de la physique à la géométrie a été obtenue de manière cruciale dans le cadre épistémologique de ce que Hilbert appelait la « méthode axiomatique ». [204]

Après avoir terminé la relativité générale, Einstein a tenté de développer une théorie qui unifie la gravité et l'électromagnétisme, en généralisant la géométrie riemannienne ou en ajoutant des dimensions supplémentaires, mais en excluant la réduction de la physique à la géométrie. [205] Jusqu'en 1925, il a inventé les premières « théories de champ unifiées » géométriques. [206] Aucun de ces efforts n'a été couronné de succès. Dans son programme de recherche pour l'unification géométrique, la méthodologie de recherche d'Einstein a subi un changement radical, [207] s'appuyant de plus en plus sur « des considérations d'esthétique mathématique, de simplicité logique et d'inévitabilité de certaines structures mathématiques sous diverses contraintes, adoptées essentiellement pour des raisons philosophiques. » [208]

---

[202] Friedman.

[203] Oliver Lodge, « The Geometrisation of Physics, and Its Supposed Basis on the Michelson-Morley Experiment », News, Nature, 1921, 795–802, https://doi.org/10.1038/106795a0.

[204] K. A. Brading et T. A. Ryckman, « Hilbert's 'Foundations of Physics': Gravitation and electromagnetism within the axiomatic method », *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39, nº 1 (1 janvier 2008): 102–153, https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2007.08.002.

[205] Marco Giovanelli, « The Forgotten Tradition: How the Logical Empiricists Missed the Philosophical Significance of the Work of Riemann, Christoffel and Ricci », *Erkenntnis* 78, nº 6 (1 décembre 2013): 1219–1257, https://doi.org/10.1007/s10670-012-9407-2.

[206] Tilman Sauer, « Einstein's Unified Field Theory Program », The Cambridge Companion to Einstein, mai 2014, 281–305, https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.011.

[207] Ryckman, *Einstein*, chap. 9, 10.

[208] Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

Le mathématicien Hermann Weyl, en 1918, a tenté de reconstruire la théorie d'Einstein sur la base de l'épistémologie de la « géométrie infinitésimale pure ». [209]

En décembre 1921, l'Académie de Berlin a publié la nouvelle proposition de Theodore Kaluza sur l'unification de la gravité et de l'électromagnétisme sur la base d'une géométrie riemannienne à cinq dimensions.

Toutes les tentatives de géométrisation de la physique dans le programme unifié ont accepté la capacité des mathématiques à comprendre la structure fondamentale du monde extérieur. Ainsi, le programme du champ géométriquement unifié semble ainsi s'inscrire dans une forme de réalisme scientifique appelé « réalisme structurel », avec une teinte platonicienne. Une forme de « réalisme structurel » suppose que peu importe le caractère intrinsèque ou la nature du monde physique, seule sa structure peut être connue. Cette version a été soutenue par Russell, qui a inclus la théorie générale de la relativité dans ce cadre. [210]

Dans sa forme contemporaine, le réalisme structurel a une forme à la fois épistémique et « ontique », selon laquelle les caractéristiques structurelles du monde physique sont ontologiquement fondamentales. [211] Thomas A. Ryckman affirme que les théories d'unification géométrique correspondent à ce type de réalisme. Pour Weyl et Eddington, « l'unification géométrique était une tentative d'harmoniser la théorie de la gravité d'Einstein dans une nouvelle lumière épistémologique et explicative, en affichant les lois du champ de gravité et de l'électromagnétisme dans le cadre commun d'un observateur représenté géométriquement - une réalité indépendante ». [212]

En ce qui concerne la géométrisation de la physique, il y a eu une controverse permanente sur les conventions scientifiques[213] et sur le fait que le choix de la géométrie soit empirique, conventionnel ou *a priori*. Duhem[214] déclare que les hypothèses ne peuvent pas être testées isolément, mais seulement dans le cadre de la théorie dans son ensemble (holisme théorique et sous-détermination

---

[209] Hermann Weyl, Axel Hildebrand, et Dieter Schmalstieg, *Raum. Zeit. Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie*, 7. (Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo: Springer, 1988), 115-16.

[210] Bertrand Russell, *The Analysis of Matter*, First Paperback Edition edition (Nottingham: Spokesman Books, 2007), 395.

[211] Pierre Maurice Marie Duhem, Jules Vuillemin, et Louis de Broglie, *The Aim and Structure of Physical Theory*, trad. par Philip P. Wiener, 9932nd edition (Princeton: Princeton University Press, 1991).

[212] Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

[213] Paul Arthur Schilpp, éd., *Albert Einstein, Philosopher-Scientist: The Library of Living Philosophers Volume VII*, 3rd edition (La Salle, Ill.: Open Court, 1998).

[214] Duhem, Vuillemin, et Broglie, *The Aim and Structure of Physical Theory*.

du choix de la théorie par des preuves empiriques). Dans une adresse en 1918 à Max Planck, Einstein a déclaré de sous-détermination :

> « La tâche suprême du physicien est ... la recherche des lois élémentaires les plus générales à partir desquelles l'image du monde doit être obtenue par déduction pure. Aucun chemin logique ne mène à ces lois élémentaires ; seule l'intuition est fondée sur une compréhension empathique de l'expérience. Dans cet état d'incertitude méthodologique, on peut penser que de nombreux systèmes équivalents de principes théoriques sont possibles ; et cette opinion est, en principe, certainement correcte. Mais le développement de la physique a montré que, de toutes les constructions théoriques imaginables, une seule, à un moment donné, s'est révélée supérieure inconditionnellement à toutes les autres. Aucun de ceux qui se sont penchés sur ce sujet ne niera que, dans la pratique, le monde des perceptions détermine sans équivoque le système théorique, même si aucune voie logique ne mène des perceptions aux principes fondamentaux de la théorie. » [215]

Einstein considèrait que le réel physique implique exclusivement ce qui peut être construit à partir des coïncidences espace-temps, les points espace-temps étant considérés comme des intersections des lignes de l'univers (« l'argument point-coïncidence »). [216] Les coïncidences ont donc un rôle ontique privilégié car elles sont invariables et donc uniquement déterminées. [217] La force du RG est également « géométrisée ». [218] La métrique espace-temps dans RG est réductible au comportement des entités matérielles (horloges, faisceaux lumineux, géodésiques, etc.). [219] Il s'avère que la mesure dépend des instruments de mesure choisis comme étalons, et les relations métriques impliquent les étalons choisis.

Paul Feyerabend considère Einstein comme un adepte « opportunist ou cynique », respectivement un anarchist, de la méthodologie. [220] Arthur Fine déclare qu'Einstein adopte une vision proche de

---

[215] Albert (Author) Einstein, « Motive des Forschens. », 1918, 31, http://alberteinstein.info/vufind1/Record/EAR000079148.

[216] Don A. Howard, « Einstein's Philosophy of Science », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Fall 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/einstein-philscience/.

[217] Nicolae Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale* (MultiMedia Publishing, 2018), http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242.

[218] Adolf Grünbaum, *Philosophical Problems of Space and Time: Second, Enlarged Edition* (Springer Science & Business Media, 2012).

[219] Paul Feyerabend, *Against Method* (London: New Left Books, 1975).

[220] Michael Esfeld et Vincent Lam, « Moderate Structural Realism About Space-Time », *Synthese* 160, nº 1 (2008): 18, 56-57, 213n.

l'attitude ontologique naturelle. [221] van Frassen considérait Einstein comme un empiriste constructif. [222] Nicholas Maxwell déclare que l'empirisme axé sur le but, en tant que nouvelle méthode de découverte, est la vision mature de la science d'Einstein pour surmonter une grave crise scientifique : [223] la disparition de la physique classique à la suite de la théorie quantique de Planck de 1900. L'empirisme axé sur le but prétend que la science émet des hypothèses permanentes sur la nature de l'univers, indépendamment des considérations empiriques.

Popper, [224] Kuhn[225] et Lakatos[226] défendent des versions de l'empirisme standard dans le cas d'Einstein.

Vincent Lam et Michael Esfeld soutiennent le concept de réalisme structurel ontique (RSO), dans lequel « l'espace-temps est une structure physique formée par des réseaux de relations physiques entre des objets physiques qui ne possèdent pas d'identité intrinsèque indépendamment des relations dans lesquelles ils se trouvent », [227] qui peut prendre en compte les caractéristiques fondamentales de la RG de l'invariance du difféomorphisme[228] et de l'indépendance de fond[229]. La localisation au sein du RSO est dynamique et indépendante du fond, étant difféomorphe invariante, codant ainsi bien la caractéristique de la RG de l'indépendance du fond.

Selon Don A. Howard, « la philosophie d'Einstein est une synthèse originale d'éléments extraits de diverses sources, telles que le néo-kantianisme, le conventionnalisme et l'empirisme logique, sa caractéristique distinctive étant son mélange romanesque de réalisme avec une forme holistique sous-déterministe de conventionnalisme. » [230]

---

[221] Arthur Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory* (University of Chicago Press, 1986), 9.

[222] Fine, 108.

[223] Nicholas Maxwell, *Karl Popper, Science and Enlightenment* (London: UCL Press, 2017).

[224] Karl Popper, *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, 2nd edition (London ; New York: Routledge, 2002).

[225] Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*.

[226] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*.

[227] Vincent Lam et Michael Esfeld, « The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity », *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 43, nº 2 (2012): 243–258.

[228] Le diféomorphisme est une cartographie bijective et lisse entre des variétés différenciées dont l'inversion est également lisse.

[229] Esfeld et Lam, « Moderate Structural Realism About Space-Time ».

[230] Howard, « Einstein's Philosophy of Science ».

Il y a quelques idées centrales dans la philosophie d'Einstein :

- Sous-détermination de l'option théorique par des preuves
- Simplicité et le choix de la théorie
- Univocité dans la représentation théorique de la nature
- Réalisme et séparabilité
- Distinction entre les théories des principes et les théories constructives.

Pour Einstein, la *simplicité* est le critère principal du choix théorique lorsque les expériences et observations ne donnent pas d'indications suffisamment claires. [231] L'*univocité* dans la représentation théorique de la nature ne doit pas être confondue avec un déni de la thèse de la *sous-détermination*. Le principe d'univocalité a joué un rôle central dans la formulation d'Einstein de la relativité générale, y compris dans l'élaboration de « l'argument du trou » considéré comme erroné par certains physiciens. [232]

De nombreux philosophes et scientifiques considèrent que la contribution la plus importante d'Einstein à la philosophie des sciences était la distinction qu'il faisait entre les théories des principes et les théories constructives. Selon Einstein, une ***théorie constructive*** offre un modèle constructif pour les phénomènes d'intérêt. Une ***théorie des principes*** consiste en un ensemble de généralisations empiriques de haut niveau individuel bien confirmé. Einstein déclare que la compréhension finale nécessite une théorie constructive, mais les progrès de la théorie peuvent être « entravés par des tentatives prématurées de développer des théories constructives en l'absence de contraintes suffisantes pour restreindre un éventail de possibilités constructives. » Le rôle des théories fondées sur des principes est de fournir des contraintes, et le progrès est réalisé sur la base de tels principes. *Einstein déclare que c'était sa méthodologie pour découvrir la théorie de la relativité comme théorie principale, les deux autres principes étant le principe de la relativité et le principe de la lumière.*

Notez la similitude entre l'idée des « théories des principes » en tant que contraintes d'Einstein et le « noyau dur » de Lakatos (heuristique négative) qui aurait été la somme des « théories des principes » d'Einstein.

La distinction entre les théories de principe et les théories constructives a joué un rôle explicite dans la pensée d'Einstein. Harman a noté que des versions primitives de cette distinction étaient utilisées depuis le 19e siècle par James Clerk Maxwell. [233]

---

[231] John Norton, *How Einstein Found His Field Equations: 1912-1915*, 1984, 21, 23.

[232] P. M. Harman et Peter Michael Harman, *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell* (Cambridge University Press, 2001).

[233] Subrahmanyan Chandrasekhar, *The Mathematical Theory of Black Holes* (Clarendon Press, 1998).

Les équations d'Einstein sont difficiles à résoudre exactement, mais il existe actuellement plusieurs solutions exactes, telles que la solution de Schwarzschild, la solution de Reissner-Nordström et la métrique Kerr, chacune correspondant à un certain type de trou noir dans un univers par ailleurs vide, [234] et les univers de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker et de Sitter, chacun décrivant un cosmos en expansion. [235] D'autres solutions exactes incluent l'univers Gödel (avec la possibilité de voyager dans l'espace-temps), la solution Taub-NUT (un univers homogène mais anisotrope) et l'espace anti-de Sitter (avec la conjecture de Maldacena) [236]. En raison de la difficulté de ces équations, des solutions sont actuellement recherchées par intégration numérique sur ordinateur ou par l'examen des petites perturbations de solutions exactes. A partir des solutions approximatives trouvées par les théories des perturbations fait également partie l'extension post-newtonienne, développée par Einstein, avec une distribution de matière qui se déplace lentement par rapport à la vitesse de la lumière. Une caractéristique particulière de cette extension est le *formalisme post-newtonien paramétré*, qui permet des comparaisons quantitatives entre les prédictions de la relativité générale et les théories alternatives.

En imposant la covariance générale, toutes les vérifications spatio-temporelles supposent une détermination des coïncidences spatio-temporelles. [237] Schlick déclare que le passage de l'article d'Einstein de 1916 traitant cet aspect représente la naissance de la distinction observation/théorie moderne et le début d'interprétations empiriques et véridiques du positivisme ultérieur. [238]

Einstein espérait que la relativité générale étendrait la relativité du mouvement de l'équivalence galiléenne à l'équivalence de tous les états de mouvement, y compris la rotation, sur la base de l'hypothèse que la covariance générale ou l'équivalence des descriptions de coordonnées garantit l'équivalence souhaitée. Mais en soi, la covariance générale n'est pas un tel argument, incapable de résoudre le problème originel de la relation d'Einstein entre le mouvement. Ce problème est, par essence, un problème de structure géométrique. [239] Selon Disalle, Einstein a fait une confusion épistémologique en acceptant l'idée que les mouvements relatifs peuvent être connus indépendamment de toute théorie spatiale, pour permettre aux mouvements relatifs d'avoir une position épistémologiquement privilégiée. Disalle conclut que le relationnalisme classique,

---

[234] Jayant Vishnu Narlikar, *Introduction to Cosmology* (Jones and Bartlett, 1983).

[235] Albert Einstein, *The Principle of Relativity* (S.l.: BN Publishing, 2008), 78.

[236] Stephen W. Hawking et al., *The Large Scale Structure of Space-Time*, New Ed edition (Cambridge: Cambridge University Press, 1975).

[237] A. Einstein, « The foundation of the general theory of relativity », in *The Principle of Relativity. Dover Books on Physics. June 1, 1952. 240 pages. 0486600815, p. 109-164*, 1952, 117, http://adsabs.harvard.edu/abs/1952prel.book..109E.

[238] Moritz Schlick, *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation* (Mineola, N.Y: Dover Publications, 2005).

[239] Disalle, « Spacetime Theory as Physical Geometry ».

considéré comme une critique épistémologique de la théorie de l'espace-temps, est lui-même une théorie spatiale.

Riemann (1867) et Helmholtz (1870) ont déclaré que toutes les mesures géométriques dépendent des hypothèses physiques sous-jacentes à la méthode de mesure, car une géométrie empirique doit postuler non seulement une structure géométrique, mais aussi une représentation d'un processus physique idéalisé. [240] Pour Riemann, le lien entre la géométrie et la physique devra être basé sur des objets physiques et des processus plus compliqués. Une telle connexion implique un principe physique, une idée reprise par Einstein pour la courbure de l'espace-temps. [241]

Poincaré a affirmé que toute mesure peut s'accorder avec n'importe quelle géométrie, si l'on élimine les écarts par l'hypothèse d'une force de distorsion qui affecte les instruments de mesure. [242] Reichenbach et Schlick ont systématisé ce concept par la notion de « définition coordonnée », orientant l'empirisme vers le conventionnalisme, avec une géométrie avec des définitions qui mettent en corrélation les concepts fondamentaux avec un objet donné empirique. [243] [244] Ainsi, Reichenbach a déclaré que : « la signification philosophique de la théorie de la relativité réside ... dans le fait qu'elle a démontré la nécessité de définitions de coordinateurs métriques à plusieurs endroits où des relations empiriques ont été précédemment supposées. » [245]

Un exemple de ceci est la simultanéité. La physique newtonienne considérait la simultanéité des événements comme un fait empirique, tandis qu'Einstein imposait la simultanéité comme principe physique. La vitesse de la lumière étant considérée comme invariante, il s'est avéré que la simultanéité est relative. Disalle affirme que la définition d'Einstein de la simultanéité est circulaire, car elle implique déjà un principe de mesure du temps. Einstein a nié, affirmant que la définition n'impliquait rien à propos de la lumière, l'invariance de la vitesse de la lumière n'étant pas une

---

[240] Bernhard Riemann et Hermann Weyl, *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1919), 133-52, https://www.springer.com/gp/book/9783662423165.

[241] Albert Einstein, *Geometrie und Erfahrung: Erweiterte Fassung des Festvortrages Gehalten an der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 27. Januar 1921* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1921), 123-30, https://www.springer.com/de/book/9783642499036.

[242] Henri Poincare, *The Foundations of Science; Science and Hypothesis, the Value of Science, Science and Method* (Place of publication not identified: TheClassics.us, 2013), 81-84.

[243] Hans Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time*, 1st edition (New York, NY: Dover Publications, 1957).

[244] Moritz Schlick, *Allgemeine Erkenntnislehre: Abteilung I / Band 1*, éd. par Hans Jürgen Wendel et Fynn Ole Engler, Abteilung I: Veröffentlichte Schriften (Wien: Springer-Verlag, 2009), https://www.springer.com/gp/book/9783211327685.

[245] Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time*, 15.

hypothèse, mais « une disposition que je peux faire librement, afin d'obtenir une définition de la simultanéité ». [246] Disalle conclut que le problème de la nature de l'espace-temps n'est pas de savoir si une entité théorique fournit une explication causale aux apparences, mais si les processus de mesure physiques sont conformes aux lois géométriques. En conclusion, Reichenbach nie le rôle de la géométrie dans l'explication de la cause profonde des relations spatiales. [247]

Mais Einstein relie l'espace-temps non seulement à une certaine procédure, mais à un système de lois naturelles, les lois de l'électrodynamique, qu'il considère comme des invariants fondamentaux. Ainsi, la définition coordonnée des états de mouvement est un processus plus subtil que Reichenbach a proposé, impliquant de ne pas choisir un cadre de repos mais d'établir les lois du mouvement. Dans la pratique, les lois du mouvement sont ainsi devenues, à travers des définitions coordinatives, postulées de la géométrie espace-temps. [248]

Selon Lakatos, la théorie d'Einstein n'est pas meilleure que celle de Newton à cause de la réfutation de la théorie de Newton : il y a des « anomalies » aussi dans la théorie d'Einstein. Mais cela représente une progres par rapport à la théorie de Newton, car il a expliqué tout ce qui expliquait avec succès la théorie de Newton, et a également expliqué les anomalies de cette théorie. De plus, il a prédit avec succès des événements dont la théorie de Newton ne disait rien.

2.1 L'heuristique du programme de la relativité générale

Le principe essentiel de coordination dans la relativité générale (RG) est le principe d'équivalence, y compris une heuristique négative. L'argument « n'est pas que tous les cadres de référence sont équivalents, mais que la coordination classique d'un mouvement uniforme en ligne droite avec les chemins de particules sans force appliquée ne peut pas être réalisée sans ambiguïté ou inconsistance. » [249] Le principe d'équivalence stipule que la décomposition du mouvement gravitationnel en un mouvement uniforme et une accélération gravitationnelle ne peuvent pas être uniques, car la chute libre ne se distingue pas localement du mouvement uniforme. Cependant, une telle décomposition implique une violation de la covariance générale, car elle représente un choix arbitraire d'un système de coordonnées. [250] Pour tout système de coordonnées, si nous identifions ses lignes avec les lignes géodésiques, nous pouvons construire le champ gravitationnel afin que la différence entre ces géodésiques et les mouvements réels puisse être différenciée. [251]

---

[246] Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, 15.

[247] Disalle, « Spacetime Theory as Physical Geometry ».

[248] Disalle.

[249] Disalle.

[250] Einstein, « The foundation of the general theory of relativity », 114.

[251] Einstein, 142-43.

La théorie de la relativité spéciale d'Einstein (RS) repose sur deux postulats fondamentaux : le postulat de la lumière (la vitesse de la lumière, dans le « cadre de repos », est indépendante de la vitesse de la source), et le principe de la relativité. Cette dernière a été explicitement adoptée par Einstein comme moyen de restreindre la forme des lois, quelle que soit leur structure détaillée. Ainsi, nous avons la différence entre une théorie « constructive » et une théorie « principale ». La théorie générale de la relativité a été développée en utilisant comme noyau un principe de symétrie : le principe de covariance générale. [252] Initialement, Einstein voyait le principe de la covariance générale comme une extension du principe de la relativité de la mécanique classique et de la RS. Pour Einstein, le principe de covariance générale était un postulat crucial dans le développement de la RG. La liberté du difféomorphisme de la RG (invariance de la forme des lois sous les transformations des coordonnées en fonction des fonctions arbitraires de l'espace et du temps) est une symétrie spatio-temporelle « locale », par opposition aux symétries spatio-temporelles « globales » de la RS (qui dépendent plutôt des paramètres constants).

Ces dernières années, il y a eu de nombreux débats en physique et philosophie concernant certains types de symétries agissant dans l'espace des théories. De telles symétries sont interprétées comme entraînant une « équivalence » entre deux théories qui seraient liées à une « symétrie duale » (dans le cas d'une « symétrie » au sens strict d'un automorphisme, elles sont appelées « auto-dualités »). Katherine Brading[253] illustre par les dualités entre les théories quantiques des champs (telles que la dualité magnétique / électrique généralisée), entre les théories des cordes (telles que les dualités T et S) et entre les descriptions physiques qui sont, comme une théorie des champs quantiques et une théorie des cordes, comme dans le cas des dualités jauge / gravité. [254] D'autres exemples sont la dualité position-quantité de mouvement, la dualité onde-particule, ou la dualité Kramers-Wannier du modèle d'Ising bidimensionnel en physique statistique. Les dualités sont des transformations entre les théories, tandis que la symétrie est une cartographie entre les solutions de la même théorie. Une symétrie peut être exacte (validité inconditionnelle), approximative (valable sous certaines conditions) ou rompue (selon l'objet considéré et son contexte). Les symétries ont fonctionné normativement, comme des contraintes, dans la covariance générale d'Einstein pour établir les équations de la relativité générale.

Elie Zahar a déclaré que le développement de la relativité d'Einstein était dû à ses vagues croyances métaphysiques, conformément à ses propres « prescriptions heuristiques » qui sont devenues un

---

[252] Katherine Brading, Elena Castellani, et Nicholas Teh, « Symmetry and Symmetry Breaking », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Winter 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/.

[253] Katherine Brading et Harvey R. Brown, « Symmetries and Noether's Theorems », in *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, éd. par Katherine A. Brading et Elena Castellani (Cambridge University Press, 2003), 89–109.

[254] Brading, Castellani, et Teh, « Symmetry and Symmetry Breaking ».

outil spécifique et puissant. Zahar déclare que la révolution scientifique de Kuhn ne s'applique pas au cas d'Einstein. Selon lui, deux « dispositifs heuristiques » ont conduit à la découverte de la théorie de la relativité : l'exigence interne de cohérence, et l'affirmation selon laquelle « puisque Dieu n'est pas trompeur, il ne peut y avoir d'accidents dans la nature ». Les symétries naturelles sont fondamentales au niveau ontologique, et la règle heuristique prime sur une théorie qui n'explique pas les symétries comme des manifestations plus profondes. [255]

Selon Newton, la gravité n'est pas une qualité primaire comme l'inertie ou l'impénétrabilité. Par conséquent, l'inertie et la gravité sont des propriétés indépendantes. Mais Newton déclare que la masse inertielle est égale à la masse gravitationnelle, sans expliquer la raison de cette identité (il y a une symétrie qui contredit l'indépendance des deux propriétés). Dans l'expérience de Michelson, en appliquant l'éther comme milieu universel, il s'avère qu'il est indétectable, ce qui est un paradoxe. Einstein a pris conscience de ce paradoxe. Il a éliminé l'asymétrie entre la gravité et l'inertie en proposant que tous les champs gravitationnels soient inertiels. Il avait également d'autres objections à la physique classique : la théorie électromagnétique de Lorentz faisait face à un dualisme entre des particules chargées discrètes régies par les lois de Newton et un champ continu qui respectait les équations de Maxwell; la relativité s'applique pour Lorentz à la mécanique, mais pas à l'électrodynamique; l'idée d'espace absolu (il y a un cadre inertiel privilégié), bien que son élimination n'influence pas la mécanique classique.

Einstein a apprécié le principe de la relativité pour son universalité et son rôle unificateur pour la mécanique et l'électrodynamique, ceci étant le premier principe sur lequel a développé la théorie générale de la relativité. Le deuxième principe est celui de la lumière mais, épistémologiquement, le deuxième point de départ d'Einstein pour développer la théorie générale de la relativité n'était pas le principe de la lumière, mais l'idée que les équations de Maxwell sont covariantes et expriment une loi de la nature. Le principe de la lumière résulte de cette idée, tout comme le principe de la relativité, selon Zacchar. [256]

En fait, Einstein avait le choix de développer une relativité générale basée sur les équations de Maxwell ou les lois de Newton. Mais dans le dualisme entre particules et champs, toutes les tentatives d'explication mécanique du comportement du champ ont échoué.

Selon Zahar, aucune expérience « cruciale » n'aurait pu être conçue entre la théorie de Lorentz et celle d'Einstein en 1905. Mais Minkowski et Planck ont abandoné le programme classique de relativité restreinte, contrairement à la méthodologie de Kuhn. De plus, Einstein était à cette époque un quasi-étranger, tandis que Lorentz était une autorité reconnue. Et la théorie de Lorentz a été très claire par rapport à celle d'Einstein qui impliquait une refonte majeure des notions d'espace et de temps. De plus, il n'y avait aucune anomalie que la théorie d'Einstein aurait mieux résolue que

[255] Zahar, « Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? »

[256] Zahar.

Lorentz. De plus, Lorentz lui-même était finalement convaincu de la nouvelle perspective. [257] Whittaker[258] considère Lorentz et Poincaré comme les vrais auteurs de la relativité restreinte, le mérite d'Einstein étant celui de développer la relativité générale. Ainsi, le programme éthérique de Lorentz n'a pas été vaincu par le programme de la relativité, mais il a été pratiquement développé en lui. Zahar le contredit, basé sur le fait que les deux programmes ont des heuristiques très différentes. [259]

Dans le cas de la révolution copernicienne, le programme platonique de modélisation du phénomène par des mouvements circulaires et sphériques a d'abord été couronné de succès, chaque planète se trouvant sur une véritable sphère physique cristalline en rotation axiale. Il a été découvert plus tard que la distance entre la terre et les planètes varie, de sorte que des hypothèses supplémentaires ont été faites à travers des excentricités, des épicycles et des écrans, pour expliquer les nouvelles observations. Lorsque l'on a essayé de déterminer le mouvement des corps célestes vers la terre en raison des mouvements inégaux, il est apparu des différences entre les phénomènes et les méthodes mathématiques qui ne permettaient que des mouvements circulaires avec la terre au centre de l'univers. Copernic, bien qu'il a considéré le soleil comme fixe, n'a pas résolu cette différence, recourant toujours aux épicycles. Kepler est celui qui a aboli les épicycles et a trouvé les lois du mouvement elliptique des planètes avec le Soleil dans un foyer. Lorentz a utilisé les transformations galiléennes, éliminant les épicycles mais donnant au cadre éthérique un statut privilégié. Tout comme Copernic était conscient de l'idéalisation de son modèle planétaire, Lorentz a compris par la suite que les coordonnées effectives, et non les coordonnées galiléennes, sont les quantités mesurées dans le cadre mobile. Einstein a abandonné les transformations galiléennes et a identifié les coordonnées réelles mesurées comme les seules réelles. L'heuristique d'Einstein est basée sur une exigence générale de covariance de Lorentz pour toutes les lois physiques, imposant le renoncement aux transformations galiléennes.

Zahar affirme que Lorentz et Einstein ont utilisé des heuristiques différentes dans leurs programmes de recherche. [260] Le programme éthérique a été essentiellement remplacé par un programme avec une plus grande puissance heuristique, c'est pourquoi Planck a abandonné la théorie de Lorentz en faveur d'Einstein juste avant que le programme d'Einstein ne devienne progressivement empirique. Les deux théories sont similaires en termes de « noyau dur » (heuristique négative), et peuvent être considérées comme des programmes bifurqués. C'est la différence entre l'heuristique positive qui a conduit au choix des scientifiques par le programme d'Einstein au début du siècle dernier. L'heuristique positive de Lorentz a consisté à fournir à l'éther des propriétés qui expliqueraient de nombreux phénomènes physiques, dont le champ électromagnétique et la mécanique newtonienne.

---

[257] Zahar.

[258] Edmund Taylor Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity* (Harper, 1960).

[259] Zahar, « Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? »

[260] Zahar.

Cette approche a permis un développement rapide du programme de Lorentz, mais à la fin du XIXe siècle, l'heuristique avait atteint un point de saturation. Un certain nombre de programmes dégénérés en tant que modèles mécaniques ont émergé pour résoudre les anomalies d'éther. Pour expliquer certains phénomènes électromagnétiques, Lorentz a introduit le postulat de l'éther au repos, mais les calculs ultérieurs ont contredit cette hypothèse.

Les différences entre les vues de Lorentz et d'Einstein étaient métaphysiques : Lorentz croyait que l'univers respecte les lois intelligibles (il y a un environnement propagé, un absolu « maintenant », etc.), tandis que pour Einstein l'univers est régi par des principes mathématiques cohérents (lois covariantes, etc.) Zahar déclare que toutes les révolutions scientifiques majeures ont été accompagnées d'une augmentation de la cohérence mathématique accompagnée d'une perte (temporaire) d'intelligibilité (l'astronomie newtonienne est plus cohérente que ptolémaïque, mais l'action à distance n'a pas été acceptée auparavant Newton, et puis accepté à la fin du XVIIIe siècle et à nouveau rejeté après Maxwell). Dans le programme de recherche de Lorentz, le comportement du champ électromagnétique était venu á dicter les propriétés de l'éther, même improbables (par exemple, l'éther au repos et agissant par des forces nettes nulles). En fait, la stratégie heuristique de Lorentz s'est inversée : au lieu de déduire une théorie de l'éther considéré comme fondamental, l'éther résulte en fonction du champ. L'heuristique d'Einstein était basée sur l'exigence que toutes les lois physiques soient Lorentz-covariantes (pour qu'elles prennent la même forme quel que soit le cadre de référence), et que la loi classique émerge de la nouvelle loi comme un cas à la limite.

Afin d'obtenir une théorie relativiste de la gravité, Einstein a maintenu le principe d'équivalence, décidé de traiter tous les systèmes de coordonnées de manière égale et d'imposer une condition de covariance générale à toutes les lois. Le succès empirique de la relativité générale par la prédiction correcte du comportement du périhélie de Mercure s'est révélé crucial pour le développement futur du programme.

Depuis 1905, le programme de la relativité s'est révélé supérieur heuristique par rapport au classique. Mais la relativité restreinte n'a pas réussi à surpasser le programme Lorentz. L'expérience de Bucherer[261] a confirmé les deux hypothèses, et l'expérience de Kaufmann[262] a nié les deux. Avant l'émergence de la relativité générale, la communauté scientifique parlait de la théorie de Lorentz-Einstein, les considérant comme équivalentes du point de vue d'un observateur. La relativité générale a réussi à remplacer empiriquement le programme de Lorentz en expliquant avec

---

[261] A. H. Bucherer, « Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips », *Annalen der Physik* 333 (1909): 513-36, https://doi.org/10.1002/andp.19093330305.

[262] W. Kaufmann, « Über die Konstitution des Elektrons », *Annalen der Physik* 324 (1906): 949, https://doi.org/10.1002/andp.19063240303.

succès la « précession anormale » du périhélie de Mercure. Cette prédiction était un progrès empirique. De plus, la relativité générale s'est avérée plus falsifiable.

Nicholas Maxwell propose également une méthode pour l'unification de deux théories « qui se contredisent » [263]. La méthode qu'il propose pour établir la théorie unifiée est la suivante : parmi les deux théories, on choisit les éléments communs qui ne se contredisent pas, les éléments contradictoires sont supprimés, et sur cette base, la nouvelle théorie est développée. Il n'illustre pas suffisamment, à mon avis, quels seraient ces éléments communs dans le cas de la mécanique classique et de l'électrodynamique classique, considérés par tous les scientifiques comme deux théories contradictoires et dont est issue la théorie spéciale de la relativité. Aussi, Nicholas Maxwell impose l'existence d'une « hypothèse cruciale », dont la falsifiabilité permet l'acceptation de la théorie à la suite d'une méthode de découverte basée sur l'empirisme axé sur le but. Dans la physique d'aujourd'hui, il existe d'innombrables exemples de théories unificatrices (comme la théorie M qui proposent l'unification de toutes les forces fondamentales, y compris la gravité) qui n'avait pas l'intention de devenir falsifiables par des « hypothèses cruciales ».

La relativité générale est le résultat de l'unification par Einstein de la théorie de la gravité universelle de Newton (avec l'action instantanée de la gravité à distance) et de la théorie spéciale de la relativité (avec la limitation de toute vitesse, à la valeur constante de la vitesse de la lumière, *c*). Ces deux principes se contredisent. Ainsi, selon Maxwell, ils devraient être retiré de la future théorie unificatrice.

2.2 Prolifération des théories post-einsteiniennes

Immédiatement après l'élaboration et le succès de la relativité générale, des théories alternatives pour la gravité ont commencé à apparaître, qui peuvent se diviser en quatre grandes catégories : [264]

- Théories bifurquées (dont le noyau dur est identique ou très similaire à celui de la relativité générale), ou directement liées à la relativité générale mais non bifurquées, comme les théories bimétriques Cartan, Brans-Dicke et Rosen.
- Théories unificatrices qui tentent d'unifier la mécanique quantique avec la réactivité générale (théories de la gravité quantique), comme la gravité quantique en boucles.
- Théories unificatrices qui tentent d'unifier la gravité avec d'autres forces, telles que Kaluza-Klein.
- Théories unificatrices qui tentent d'unifier plusieurs théories simultanément, comme la théorie M.

---

[263] Maxwell, *Karl Popper, Science and Enlightenment*.

[264] Timothy Clifton et al., « Modified Gravity and Cosmology », *Physics Reports* 513, nº 1-3 (mars 2012): 1–189, https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001.

En développant ces théories, de nombreuses stratégies différentes (heuristiques positives) ont été essayées, en ajoutant de nouvelles hypothèses à la RG, en utilisant un espace-temps pour lequel l'univers est statique, des hypothèses qui éliminent les singularités gravitationnelles, etc. Dans la compétition avec la RG, il a jusqu'à présent gagné la théorie d'Einstein, prouvant de loin un pouvoir heuristique plus grand que ses rivaux. Certaines de ces théories ont été abandonnées, d'autres sont développées par diverses communautés de chercheurs, essayant d'éliminer les anomalies trouvées dans la RG, ou d'élargir la RG par bifurcation ou en tant que théories unificatrices.

Après 1980, lorsque la communauté scientifique a convenu que la RG est confirmée, généralement, seules les théories qui incluent la RG dans un cas particulier ont survécu. Une attention particulière a commencé à être accordée aux théories de la gravité quantique, en particulier la théorie des cordes. La plupart des nouvelles théories de la gravité non quantique tentent de résoudre diverses anomalies cosmologiques, telles que l'inflation cosmique, la matière noire, l'énergie noire, etc. La prolifération des anomalies de la RG ces derniers temps, y compris dans le cas Pioneer, a conduit à une renaissance des alternatives à cette théorie.

La plupart des théories de la première catégorie listées ci-dessus incluent une densité lagrangienne, une « action" (qui garantit l'existence de lois de conservation, et dont la composante gravitationnelle est déduite de la densité lagrangienne par intégration) [265], et une métrique.

Les théories métriques peuvent être classées en (du plus simple au plus complexe):

- Théories sur les champs scalaires (inclure les théories planes conformes et les théories stratifiées avec des tranches d'espace conformes)
- Théories quasi-linéaires
- Théories tensorielles
- Théories tensorielles-scalaires
- Théories tensorielles-vectorielles
- Théories bimétriques
- Autres théories métriques

Les théories non métriques les plus importantes comprennent

- Belinfante-Swihart
- Théorie d'Einstein-Cartan
- Kustaanheimo
- Téléparallélisme
- Gravité basée sur la théorie des jauges

---

[265] Franz Mandl et Graham Shaw, *Lagrangian Field Theory, in Quantum Field Theory* (John Wiley & Sons, 2013), 25–38.

Certaines de ces théories sont basées sur le principe de Mach (le cadre de référence provient de la distribution de la matière dans l'univers[266], considéré comme un intermédiaire entre Newton (espace et temps absolus) et Einstein (il n'y a pas de cadre de référence absolu). Des preuves expérimentales montrent que le principe Mach a tort, mais les théories connexes n'ont pas été entièrement exclues.

Afin de vérifier et de classer toutes ces théories, des tests spécifiques ont été développés, basés sur l'auto-consistence (parmi les théories non métriques comprend l'élimination des théories qui autorisent les tachyons, les pôles fantômes et les pôles d'ordre supérieur, et ceux qui ont des problèmes avec le comportement à infini), et sur la complétude (pour permettre l'analyse du résultat de chaque expérience d'intérêt). Par exemple, toute théorie qui ne peut prédire à partir des premiers principes le mouvement des planètes ou le comportement des horloges atomiques est considérée comme incomplète.

Trois tests sont considérés comme « classiques » pour la capacité des théories de la gravité à gérer les effets relativistes :

- Décalage vers le rouge gravitationnel
- Lentilles gravitationnelles (autour du Soleil)
- Avance anormale du périhélie des planètes.

A ces tests a été ajouté, en 1964, le quatrième test, appelé le délai Shapiro. Chaque théorie devrait confirmer ces tests.

Le principe de l'équivalence d'Einstein (PEE), qui est également testé pour les théories relativistes de la gravité, a trois composantes :

- *Unicité de la chute libre* (principe de faible équivalence) : la masse inertielle est égale à la masse gravitationnelle
- *Invariance de Lorentz* : en l'absence d'effets gravitationnels, la vitesse de la lumière est constante
- *Invariance de la position locale* : le résultat de toute expérience locale non gravitationnelle est indépendant de l'endroit et du moment où elle est effectuée.

La conjecture de Schiff indique que toute théorie de gravité complète et cohérente qui vérifie le principe de la faible équivalence vérifie nécessairement le principe de l'équivalence d'Einstein (si la théorie a une conservation complète de l'énergie).

---

[266] Alfred North Whitehead, *The Principle Of Relativity With Applications To Physical Science* (Whitefish, Mont.: Kessinger Publishing, LLC, 2008).

Les théories métriques satisfont le PEE. Seules certaines théories non métriques satisfont au PEE.

Les principales théories post-relativité générale non quantique sont la théorie de Brans-Dicke, la cinquième force et la géométrodynamique

La **théorie Brans-Dicke** est une théorie scalaire-tensorielle, dans laquelle l'interaction gravitationnelle est médiée par un champ scalaire et par le champ tensoriel de la relativité générale[267]. La théorie est considérée comme en accord général avec les observations. La source du champ gravitationnel est, comme dans la RG, le tenseur d'énergie de contrainte ou le *tenseur de matière*. Dans la théorie Brans-Dicke, en plus des métriques qui ont un *champ tensoriel de second rang*, il existe un *champ scalaire* qui modifie la *constante gravitationnelle* réelle en fonction de l'emplacement (c'est une caractéristique clé de la théorie, faisant partie du noyau dur). La théorie de Brans-Dick, comparée à la RG, admet plusieurs solutions. Il prédit la déviation de la lumière et la précession du périhélie planétaire, et la relativité générale peut être dérivée de la théorie de Brans-Dicke comme un cas particulier, mais Pharaon soutient que cela n'est pas valable dans toutes les situations permises par la théorie[268], et certains physiciens affirment qu'il ne répond pas au principe d'équivalence fort.

La **cinquième force** est une théorie qui implique, en plus des forces gravitationnelles, électromagnétiques, nucléaires fortes et nucléaires faibles, une cinquième force pour expliquer diverses observations anormales qui ne correspondent pas aux théories existantes. Une hypothèse de cette théorie est que la matière noire pourrait être liée à une force fondamentale inconnue. D'autres spéculent qu'une forme d'énergie noire appelée quintessence pourrait être une cinquième force[269]. Une telle force fondamentale nouvelle et faible est difficile à tester. À la fin des années 1980, certains chercheurs[270] ont rapporté avoir découvert cette force lors de la ré-analyse des résultats de Loránd Eötvös du début du siècle, mais d'autres expériences n'ont pas réussi à reproduire ce résultat. L'un des tests qui peuvent être entrepris pour prouver la théorie est censé être basé sur le principe de l'équivalence fort (la cinquième force se manifesterait par un effet sur les orbites du système solaire, appelé effet Nordtvedt) avec Lunar Laser Ranging et interférométrie

[267] C. Brans et R. H. Dicke, « Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation », *Physical Review* 124, nº 3 (1 novembre 1961): 925–935, https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925.

[268] Valerio Faraoni, « Illusions of general relativity in Brans-Dicke gravity », *Physical Review D* 59, nº 8 (22 mars 1999): 084021, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.59.084021.

[269] Cicoli, Pedro, et Tasinato, « Natural Quintessence in String Theory », 44.

[270] E. Fischbach et al., « Reanalysis of the Eotvos experiment », *Physical Review Letters* 56 (1 janvier 1986): 3-6, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3.

de base très longue. D'autres tests peuvent considérer des dimensions supplémentaires[271] ; le manteau de la terre en tant que détecteur de particules géant, se concentrant sur les géoélectrons[272] ; taux de pulsation des étoiles variables céphéides dans 25 galaxies[273] ; et ainsi de suite. Diverses hypothèses supplémentaires ont été proposées ces dernières années pour renforcer la théorie, mais aucun résultat n'a été concluant jusqu'à présent.

La **géométrodynamique** est une tentative de décrire l'espace-temps et les phénomènes associés en termes de géométrie. Il s'agit d'une théorie unificatrice, essayant d'unifier les forces fondamentales et de reformuler la relativité générale. C'est une théorie initiée par Einstein, mais toujours active. D'une certaine manière, le terme géométrodynamique est synonyme pour la relativité générale, auquel cas il est plus précisément appelé géométrodynamique d'Einstein pour désigner la formulation initiale de la valeur de la relativité générale. John Wheeler a promu cette théorie dans les années 1960, en essayant de réduire la physique à la géométrie d'une manière fondamentale, avec une géométrie dynamique avec une courbe variable dans le temps. Fondamentalement, Wheeler a essayé d'intégrer trois concepts : masse sans masse, charge sans charge et champ sans champ. [274]

2.3 Formalisme paramétrisé post-newtonien (PPN)

Dans le domaine de la gravité expérimentale, l'une des applications importantes est le formalisme. Pour l'évaluation des modèles de gravité, plusieurs séries de tests ont été proposées. Le *formalisme post-newtonien* considère les approximations des équations de gravité d'Einstein par les écarts d'ordre le plus bas de la loi de Newton pour les champs faibles. Des termes plus élevés peuvent être ajoutés pour augmenter la précision. À la limite, l'expansion post-newtonienne est réduite à la loi de gravité de Newton. Le *formalisme paramétrisé post-newtonien (PPN)* détaille les paramètres qui différencient les théories de la gravité, dans le champ gravitationnel faible et des vitesses bien inférieures à la vitesse de la lumière. PPN peut être appliqué à toutes les théories métriques de gravité dans lesquelles tous les corps satisfont au principe d'équivalence d'Einstein (PEE). La vitesse de la lumière reste constante dans le formalisme PPN et on suppose que le tenseur métrique

---

[271] A. J. Sanders et al., « Project SEE (Satellite Energy Exchange): Proposal for Space-Based Gravitational Measurements », *Measurement Science and Technology* 10, nº 6 (janvier 1999): 514–524, https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/6/317.

[272] Jacob Aron, « Earth's Mantle Helps Hunt for Fifth Force of Nature », New Scientist, 2013, https://www.newscientist.com/article/dn23202-earths-mantle-helps-hunt-for-fifth-force-of-nature/.

[273] Bhuvnesh Jain, Vinu Vikram, et Jeremy Sakstein, « Astrophysical Tests of Modified Gravity: Constraints from Distance Indicators in the Nearby Universe », *The Astrophysical Journal* 779, nº 1 (25 novembre 2013): 39, https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/39.

[274] John A. Wheeler, « On the nature of quantum geometrodynamics », *Annals of Physics* 2, nº 6 (1 décembre 1957): 604-14, https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90050-7.

est toujours symétrique. PPN est utilisé pour comparer et classer des métriques alternatives de gravité. Grâce à ce formalisme, de nombreuses théories auparavant considérées comme viables ont été éliminées.

Dans la *notation bêta-delta*, le comportement du champ gravitationnel faible en relativité générale est complètement caractérisé par dix paramètres post-newtoniens. Dans la notation de Will[275], Misner et al. [276] ils ont les valeurs suivantes :

- Γ : Quantité de courbure de l'espace g_{ij} produite par la masse au repos de l'unité
- B : Combien de non-linéarité existe dans la loi de superposition pour la gravité g_{oo}
- β_1 : Quantité de gravité produite par l'énergie cinétique unitaire $\rho_o v^2/2$
- β_2 : Quantité de gravité produite par l'énergie potentielle gravitationnelle unitaire ρ_o/U
- β_3 : Combien de gravité est produite par l'énergie interne unitaire $\rho_o\Pi$
- β_4 : Quantité de gravité produite par l'unité de pression p
- ζ : Différence entre l'énergie cinétique radiale et transversale sur la gravité
- η : Différence entre les contraintes radiales et transversales sur la gravité
- Δ_1 : Quantité de glissement des cadres inertiels g_{0j} produite par la quantité de mouvement unitaire $\rho_0 v$?
- Δ_2 : La différence entre les quantités de mouvement radiale et transversale dans la précession Lense-Thirring des cadres inertiels

Ici, $g_{\mu\nu}$ est le tenseur métrique symétrique 4x4 avec des indices μ et v prenant des valeurs comprises entre 0 et 3. Un indice 0 indiquera la direction du temps et les indices i et j avec des valeurs de 1 à 3 indiqueront les directions spatiales. En relativité générale, les valeurs de ces paramètres sont choisies de manière à ce que, dans les limites de vitesse et de petite masse, elles coïncident avec la loi de gravité de Newton, pour assurer la conservation de l'énergie, de la masse, de la quantité de mouvement et de l'impulsion angulaire ; et assurer l'indépendance des équations par rapport au cadre de référence.

[275] C. M. Will, « Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect. », *Astrophys. J. 163: 611-28(1 Feb 1971).*, 1 janvier 1971, 163, 611-28, https://doi.org/10.1086/150804.

[276] Misner, Thorne, et Wheeler, *Gravitation*.

Pour la relativité générale, $\gamma = \beta = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \Delta_1 = \Delta_2 = 1$ et $\zeta = \eta = 0$. Dans la *notation alpha-zêta* la plus récente de Will & Nordtvedt[277] et Will[278], un ensemble différent de dix paramètres PPN est utilisé.

- $\gamma = \gamma$
- $\beta = \beta$
- $\alpha_1 = 7\Delta_1 + \Delta_2 - 4\gamma - 4$
- $\alpha_2 = \Delta_2 + \zeta - 1$
- $\alpha_3 = 4\beta_1 - 2\gamma - 2 - \zeta$
- $\zeta_1 = \zeta$
- $\zeta_2 = 2\beta + 2\beta2 - 3\gamma - 1$
- $\zeta_3 = \beta3 - 1$
- $\zeta_4 = \beta_4 - \gamma$
- ξ est calculé à partir de $3\eta = 12\beta - 3\gamma - 9 + 10\xi - 3\alpha_1 + 2\alpha_2 - 2\zeta_1 - \zeta_2$

α1, α2 et α3 mesurent la magnitude des effets de cadre préféré. ζ1, ζ2, ζ3, ζ4 et α3 mesurent l'écart par rapport à la conservation d'énergie, de la quantité de mouvement et de l'impulsion angulaire.

Dans cette notation, la relativité générale a les paramètres PPN $\gamma = \beta = 1$ et $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \zeta_1 = \zeta_2 = \zeta_3 = \zeta_4 = \xi = 0$

Il existe une relation mathématique entre la métrique, le potentiel métrique et les paramètres PPN pour cette notation, avec dix potentiels métriques (un pour chaque paramètre PPN) pour garantir une solution unique. La méthodologie d'application du formalisme PPN aux théories alternatives de la gravité est un processus en neuf étapes[279]. Les limites des paramètres PPN[280] sont déterminées à partir de tests expérimentaux, comme suit :

- **Paramètre --- Limite --- Effet --- Expériment**
- γ-1 --- $2{,}3 \times 10^{-5}$ --- Temporisation, déviation de la lumière --- Surveillance de Cassini
- β-1 --- 3×10^{-3} --- Changer le périhélie --- Changer le périhélie

[277] Kenneth Nordtvedt Jr. et Clifford M. Will, « Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity », *The Astrophysical Journal* 177 (1 novembre 1972): 177, 757, https://doi.org/10.1086/151755.

[278] Clifford M. Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment », *Living Reviews in Relativity* 17, nº 1 (décembre 2014): 4, https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4.

[279] Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

[280] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

- β-1 --- 2,3 x 10^{-4} --- Effet Nordtvedt avec hypothèse $\eta_N = 4\beta - \gamma - 3$ --- effet Nordtvedt
- --- 0,001 --- La marée de la Terre --- Données gravimétriques
- α_1 --- 10^{-4} --- Polarisation des orbites --- Réflecteur mensuel
- α_2 --- 4 x 10^{-7} --- Précession de spin --- Alignement de l'axe solaire avec l'écliptique
- α_3 --- 4 x 10^{-20} --- Auto-accélération --- Statistiques pulsar spin down
- η_N --- 9 x 10^{-4} --- Effet Nordtvedt --- Réflecteur mensuel
- $_1$ --- 0,02 --- - --- Connexions PPN combinées
- $_2$ --- 10^{-8} --- Accélération des pulsars binaires --- PSR 1913 + 16
- $_3$ --- 10^{-8} --- La troisième loi de Newton --- Accélération mensuelle
- $_4$ --- 0,006 (*) --- - --- L'expérience Kreuzer

(*) Basé sur $6\zeta_4 = 3\alpha_3 + 2\zeta_1 - 3\zeta_3$ de Will. Il est théoriquement possible qu'un autre modèle de gravité contourne ce lien, auquel cas le lien est $| \zeta_4 | < 0,4$.

Tableau 2.1 Limites des paramètres PPN[281] *déterminées à partir de tests expérimentaux. Source : C. M. Will*[282]

Le seul champ gravitationnel entrant dans les équations du mouvement est la métrique *g*. D'autres champs ne contribueront qu'à la génération de courbure spatio-temporelle associée à la métrique. La matière peut créer ces champs, et ils avec la matière peuvent générer des métriques, mais ils ne peuvent pas réagir directement sur la matière. La matière ne répond qu'à la métrique[283]. Il s'avère que la métrique et les équations du mouvement de la matière sont des entités primaires pour calculer les effets observables, et la seule distinction entre deux théories métriques est la manière particulière dont la matière et éventuellement d'autres champs gravitationnels génèrent la métrique.

À la limite post-newtonienne (mouvement lent, champ faible), la comparaison d'une théorie avec les expériences gravitationnelles et des théories entre elles est suffisamment précise pour la plupart des tests, en particulier ceux impliquant le système solaire. Les différences apparaissent dans les valeurs numériques des coefficients devant le potentiel métrique (paramètres dans le formalisme PPN).

Les paramètres γ et β sont utilisés pour décrire les tests « classiques » de la RG et sont les plus importants, les seuls paramètres non nuls dans la RG et dans la gravité scalaire-tensorielle. Le paramètre ξ est non nul dans toute théorie de la gravité qui prédit les effets de l'emplacement préféré ; α_1, α_2, α_3 mesure si la théorie prédit ou non les effets du cadre post-newtonien préféré; α_3,

---

281 Will.

282 Clifford M. Will, « Is momentum conserved? A test in the binary system PSR 1913 + 16 », *The Astrophysical Journal Letters* 393 (1 juillet 1992): L59-61, https://doi.org/10.1086/186451.

283 Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

ζ_1, ζ_2, ζ_3, ζ_4 mesurent si la théorie prédit ou non la violation des lois globales de conservation pour la quantité totale de mouvement.

Carlton Morris Caves a conclu que les expériences en laboratoire pour étudier les caractéristiques non linéaires du champ gravitationnel, ainsi que les mesures en laboratoire de la gravité produite par l'énergie interne, sont difficiles et non concluantes[284]. Les expériences de laboratoire les plus accessibles du point de vue des effets post-newtoniens sont les effets de cadre préférés et l'orientation préférée (ils peuvent être modulés en faisant tourner l'ensemble de l'appareil de laboratoire par rapport à l'espace inertiel) et les effets gravitationnels de type magnétique (les effets associés à composants de la métrique *g*: glissement des cadres inertiels à travers les corps en rotation, précession gyroscopique Lens-Thirring, accélérations gravitationnelles produites par les interactions spin-spin des corps en rotation, et accélérations gravitationnelles dues au couplage spin-orbite). Les effets magnétiques sont plus sensibles au sens de rotation ou au mouvement d'une source ou d'un détecteur de laboratoire que les autres expériences de laboratoire. En tant que source, un corps axial symétrique à rotation rapide peut être utilisé et sa vitesse angulaire peut être modulée lentement. [285]

2.4 Tests de la relativité générale et des théories post-einsteiniennes

Clifford M. Will décrit, dans T*heory and Experiment in Gravitational Physics*[286], l'émergence d'une nouvelle ère pour la relativité générale, les tests et les vérifications à des niveaux de précision très élevés.

En 1959, des scientifiques des Lincoln Laboratories du Massachusetts ont bombardé la planète Vénus d'ondes radio de la Terre, espérant détecter l'écho des ondes réfléchies. Ils n'ont détecté aucun écho. Après une analyse plus approfondie, ils ont détecté un écho le 14 septembre, ce qui est le premier écho radar enregistré sur une planète.

En 1960, les astronomes Thomas Matthews et Allan Sandage et leurs collègues du Mount Palomar ont utilisé un télescope pour enregistrer une plaque photo du champ stellaire autour de la source radio 3C48. Ils s'attendaient à trouver un groupe de galaxies, mais à l'emplacement exact de la

---

[284] Caves, « Theoretical investigations of experimental gravitation ».

[285] Caves.

[286] Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

source radio, un objet a été observé comme une étoile mais avec un spectre inhabituel et une luminosité variable avec une fréquence de 15 minutes[287]. Ce fut le premier quasar observé. [288]

L'expérience Pound-Rebka (1960) a vérifié le principe d'équivalence et le décalage vers le rouge gravitationnel et a démontré l'utilité de la technologie quantique (horloges atomiques, mesures laser, gravimètres supraconducteurs, détecteurs d'ondes gravitationnelles) dans des expériences gravitationnelles de haute précision. [289]

Les radiations enregistrées depuis Vénus ont fait du système solaire un laboratoire pour tester la gravité relativiste[290]. Le programme spatial interplanétaire développé au début des années 1960 et la découverte en 1964 de l'effet relativiste du retard[291] ont offert de nouveaux tests précis de la relativité générale. Jusqu'en 1974, le système solaire était le seul moyen de réaliser des tests de haute précision de la relativité générale.

Dans le développement de la relativité générale, Einstein a été guidé par des critères théoriques d'élégance et de simplicité. Sa théorie a d'abord rencontré « trois tests classiques »: le déplacement anormal du périhélie de Mercure, la déviation de la lumière par le Soleil et le décalage vers le rouge gravitationnel de la lumière.

À la fin des années 50, il a été suggéré que le décalage vers le rouge gravitationnel de la lumière n'est pas, cependant, un véritable test de relativité générale. Il est une pure conséquence du principe d'équivalence et ne teste pas les équations de champ de la théorie gravitationnelle. Schiff a suggéré que l'expérience Eotvos est plus précise que le décalage vers le rouge gravitationnel de la lumière, qu'il a remplacé comme important, l'expérience Eotvos vérifiant dans quelle mesure les corps de composition différente ont la même accélération. [292]

Par la suite, d'autres tests de relativité générale ont été proposés, tels que l'effet Lense-Thirring, la perturbation orbitale due à la rotation d'un corps, et l'effet Sitter, un mouvement séculaire du périgée

---

[287] Thomas A. Matthews et Allan R. Sandage, « Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects. », *The Astrophysical Journal* 138 (1 juillet 1963): 30-56, https://doi.org/10.1086/147615.

[288] Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

[289] R. V. Pound et G. A. Rebka, « Apparent Weight of Photons », *Physical Review Letters* 4, nº 7 (1 avril 1960): 337-41, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337.

[290] W. B. Smith, « Radar observations of Venus, 1961 and 1959 », *The Astronomical Journal* 68 (1 février 1963): 15-21, https://doi.org/10.1086/108904.

[291] Irwin I. Shapiro, « Fourth Test of General Relativity », *Physical Review Letters* 13, nº 26 (28 décembre 1964): 789-91, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789.

[292] L. I. Schiff, « On Experimental Tests of the General Theory of Relativity », *American Journal of Physics* 28, nº 4 (1 avril 1960): 340-43, https://doi.org/10.1119/1.1935800.

et du nœud de l'orbite de la lune[293] [294], mais les perspectives de les détecter étaient encore faibles. [295]

Un autre domaine d'essai pour l'observation de la relativité générale était la cosmologie, prédisant l'explosion primordiale appelée le « Big Bang » et l'expansion subséquente de l'Univers, mais à la fin des années 1950 les observations cosmologiques ne pouvaient pas distinguer les différentes théories de la gravité. [296]

Entre-temps, une « prolifération » de théories alternatives de gravité concurrentes de la relativité générale est apparue. En 1960, il existait au moins 25 théories alternatives de ce type. [297]

Selon Will, jusqu'en 1960 la relativité générale était empiriquement appuyée par un test de précision modérée (changement de périhélie, environ 1%), un test de faible précision (distorsion de la lumière, environ 50%), un test non concluant (décalage gravitationnel vers le rouge) et des observations cosmologiques qui ne pouvaient pas distinguer entre différentes théories. C'est ce que Lakatos a appelé la « période stationnaire ». En raison de ses confirmations expérimentales limitées, la relativité générale a même été retirée de la physique de base. [298]

La période de 1960 à 1980 a été la période de maturité de la relativité générale: de nouvelles méthodes de test de haute précision ont été développées qui comprenaient de nouveaux tests, tels que la précession gyroscopique, le retard de la lumière et l '« effet Nordtvedt » dans le mouvement mensuel, y compris les observations astrophysiques et satellites artificiels.

En raison de la prolifération des théories alternatives, un meilleur cadre théorique était nécessaire pour comparer les vérifications des différentes expériences, classer les théories et comparer leurs prédictions avec les résultats des expériences de manière systématique.

---

[293] Josef Lense et Hans Thirring, « Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie », *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918): 156-63, http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PhyZ...19..156L.

[294] W. de Sitter, « On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1 décembre 1916): 77, 155-84, https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155.

[295] Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

[296] Whitrow et Morduch, « Relativistic theories of gravitation », chap. 14.

[297] C. DeWitt, *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*, Second Printing edition (Gordon & Breach, 1965), 165-313.

[298] Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

- Année
    - Résultats expérimentaux ou observationnels
        - Résultats théoriques
- 1960
    - Anisotropie de Hughes-Drever de la masse
        - Les travails de Penrose sur les spinors
    - Expérience Pound-Rebka du décalage gravitationnel vers le rouge
        - Précision gyroscopique (Schiff)
        - Théorie de Brans-Dicke
- 1962
    - Découverte des sources de rayons X non solaires
        - Formule de Bondi pour la perte de masse
    - Découverte du décalage gravitationnel vers le rouge des quasars
        - Découverte de la métrique Kerr
- 1964
    - Eotvos Experiment, Princeton
        - Retard dans le temps de la lumière (Shapiro)
    - L'expérience Pound-Snider du décalage gravitationnel vers le rouge
        - Les théorèmes de singularité en relativité générale
    - La découverte du fond micro-ondes 3K
- 1966
    - Détection d'aplatissement solaire
        - Production des éléments dans le Big Bang
    - Découverte des pulsars
- 1968
    - Mesures avec le radar planétaires pour la retard du temps
        - Effet Nordtvedt et premier cadre PPN
    - Lancement des Mariners 6 et 7
    - Écho laser lunaire
    - Premières mesures de déviation radio
- 1970
    - CygXl: un candidat au trou noir
        - Effets de cadre préféré
    - Mesures de temporisation à l'aide de Mariners 6 et 7
        - Cadre PPN raffiné
        - Augmenter de la surface des trous noirs en relativité générale
- 1972
    - L'expérience Eotvos, Moscou
- 1974
    - La découverte des pulsars binaires
        - Evaporation quantique des trous noirs
        - Rayonnement gravitationnel dipolaire dans des théories alternatives
- 1976
    - Expériences de déplacement gravitationnel vers le rouges avec des fusées
    - Test lunaire de l'effet Nordtvedt
    - Résultats de temporisation obtenus avec Mariner 9 et Viking
- 1978

    - Mesures de la décroissance de la période orbitale du pulsar binaire SS 433
- 1980
    - La découverte des lentilles gravitationnelles

Tableau 2.2 Chronologie des tests de vérification de la théorie de la relativité générale entre 1960-80. Source: Clifford M. Will, Theory and Experiment in Gravitational Physics[299]

Robert Dicke a effectué plusieurs expériences de nullité de haute précision pour confirmer les théories de la gravité[300]. Dicke a conclut que les expériences gravitationnelles peuvent être divisées en deux classes:

1. Une qui teste la base de la théorie de la gravité (par exemple, le principe d'équivalence): l'expérience Eotvôs, l'expérience Hughes-Drever, l'expérience du déplacement gravitationnel vers le rouge, etc.), vérifiant que la gravité est un phénomène spatio-temporel courbe (décrit par une « théorie métrique » de la gravité). La relativité générale et la théorie de Brans-Dick sont des exemples de théories métriques de la gravité.
2. La deuxième classe qui teste les théories métriques de la gravité: le formalisme post-newtonien paramétré, ou PPN, initié par Kenneth Nordtvedt, Jr. [301], et développé et amélioré par Will[302]. PPN prend en compte les faibles vitesses et les champs faibles (limite post-newtonienne) des théories métriques, sur la base d'un ensemble de 10 paramètres réels. Le PPN a été utilisé pour analyser les expériences gravitationnelles du système solaire, pour découvrir et analyser de nouveaux tests de la théorie de la gravité, tels que l'effet Nordtvedt, les effets de cadre préféré et les effets de localisation préféré, et pour analyser et classer des mesures alternatives de la gravité, devenant l'outil théorique standard pour ces expériences, recherches et études.

Au milieu des années 1970, de nombreuses théories alternatives de la gravité ont été confirmées par des expériences au niveau du système solaire, mais pas au niveau cosmologique. En 1974, Joseph Taylor et Russell Hulse ont découvert le pulsar binaire[303], dont les impulsions extrêmement stables ont été surveillées par radiotélescope, permettant une mesure précise des paramètres

---

[299] Will.

[300] DeWitt, *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*, 165-313.

[301] Kenneth Nordtvedt, « Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory », *Physical Review* 169, nº 5 (25 mai 1968): 1017-25, https://doi.org/10.1103/PhysRev.169.1017.

[302] Will, « Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect. », 163, 611-28.

[303] R. A. Hulse et J. H. Taylor, « Discovery of a pulsar in a binary system », *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 janvier 1975): L51-53, https://doi.org/10.1086/181708.

astrophysiques. En 1978, le taux de changement de la période orbitale du système a été mesuré, ce qui a été confirmé par la relativité générale mais pas par la plupart des théories alternatives.

Dans l'**expérience Michelson-Morley**, Michelson a testé les théories contradictoires de Fresnel et Stokes sur l'influence de l'éther. [304] [305] Stokes pensait initialement que les deux théories étaient équivalentes sur le plan de l'observation, les deux théories expliquant l'aberration de la lumière. Michelson a soutenu que son expérience de 1881 était une expérience cruciale qui démontrait la théorie de Stokes. Lorentz a souligné que Michelson avait « mal interprété » les faits et que les calculs de Michelson étaient erronés. Michelson, avec Morley, a décidé de répéter l'expérience « à des intervalles de trois mois et d'éviter ainsi toute incertitude »[306], leur conclusion rejetant l'explication de Fresnel. Lorentz a également remis en question la nouvelle expérience: « La signification de l'expérience de Michelson-Morley est plutôt qu'elle peut nous apprendre quelque chose sur les changements des dimensions. » En 1897, Michelson a fait une nouvelle expérience, concluant que le résultat de l'expérience était « improbable » et a décidé qu'en 1887 il avait tort: la théorie de Stokes devait être rejetée et celle de Fresnel devait être acceptée.

Fitzgerald, indépendant de Lorentz, a produit une version testable qui a été rejetée par les expériences de Trouton, Rayleigh et Brace car elle était théoriquement progressive, mais pas empirique, la théorie de Fitzgerald étant considérée comme *ad hoc* (qu'il n'y a « aucune preuve indépendante » [positif] pour elle) [307]. Einstein, ignorant ces expériences, mais stimulé par les critiques de Mach à l'égard de la mécanique newtonienne, est venu à un nouveau programme de recherche progressive[308], qui a « prédit » et expliqué le résultat de l'expérience de Michelson-Morley, mais a également prédit une vaste gamme de faits non découverts auparavant, qui ont obtenu des corroborations spectaculaires. Ainsi, seulement vingt-cinq ans plus tard, l'expérience Michelson-Morley est devenue une expérience cruciale, considérée comme « la plus grande expérience négative de l'histoire des sciences »[309] [310], démontrant la tolérance méthodologique préconisée par Lakatos.

---

[304] A Fresnel, « Lettre a Francois Arago sur L'Influence du Mouvement Terrestre dans quelques Phenomenes Optiques, in Annales de chimie et de physique - 98 Years available - Gallica », 1818, https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343780820/date.r=Annales+de+chimie+et+de+physique.langEN.

[305] George Gabriel Stokes, *On Fresnel's Theory of the Aberration of Light* (London, 1846), 76-81.

[306] Lorentz, « Considerations on Gravitation ».

[307] Joseph Larmor, *On the ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in relation to the Constitution of Matter, and on the FitzGerald-Lorentz Hypothesis*, 1904, 624.

[308] Karl Raimund Popper, *The Logic of Scientific Discovery* (Psychology Press, 2002).

[309] J. D. Bernal, *Science in History J. D. Bernal*, 3rd edition (M.I.T Press, 1965).

[310] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*.

Dans ce contexte, un signal typique de la dégénérescence d'un programme est la prolifération de « faits » contradictoires. En utilisant une fausse théorie comme théorie interprétative, on peut obtenir - sans commettre une « erreur expérimentale » - des propositions factuelles contradictoires, des résultats expérimentaux incohérents[311]. Michelson lui-même était frustré par l'incohérence des « faits » résultant de ses mesures.

Carlton Morris Caves a proposé six expériences de laboratoire possibles pour la gravité non newtonienne: trois utilisent une balance de torsion comme détecteur et trois utilisent un cristal diélectrique à haute sensibilité[312]. L'idée de Caves est de démontrer que la technologie rendra bientôt possible une nouvelle classe d'expériences, exclusivement en laboratoire. La conclusion de Caves est qu'aucune de ces expériences ne serait facile à faire, en raison des limites de la technologie actuelle. Mais la plupart sont réalisables dans un avenir proche.

Les effets forts de la gravité sont observés astrophysiquement (naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs), auquel cas ils sont utilisés, comme tests expérimentaux, la stabilité des naines blanches, la vitesse de rotation des pulsars, les orbites des pulsars binaires, l'existence d'un horizon de trous noirs, et ainsi de suite.

Récemment, une série de tests cosmologiques ont été développés pour les théories de la matière noire, en utilisant pour les contraintes la rotation de la galaxie, la relation de Tully-Fisher, la vitesse de rotation des galaxies naines et les lentilles gravitationnelles.

Pour les théories liées à l'inflation cosmique, le test le plus rigoureux consiste à mesurer la taille des ondes dans le spectre du rayonnement de fond micro-ondes cosmique.[313]

Pour les théories de l'énergie noire, les résultats de la luminosité de la supernova et de l'âge de l'univers peuvent être utilisés comme tests.

Il existe de grandes différences dans les prévisions entre la relativité générale et la physique classique, telles que la dilatation du temps gravitationnelle, la lentille gravitationnelle, le décalage vers le rouge gravitationnel de la lumière, etc. Et il existe de nombreuses théories relativistes de la gravité, bifurquées ou indépendantes, mais la théorie générale de la relativité d'Einstein a confirmé toutes les prédictions et est la plus simple de ces théories.

---

[311] Lakatos.

[312] Caves, « Theoretical investigations of experimental gravitation ».

[313] La fonction potentielle, qui est cruciale pour déterminer la dynamique de l'inflation, est simplement postulée et non dérivée d'une théorie physique sous-jacente.

2.4.1 Tests proposés par Einstein

Einstein déclare, dans *Teoria relativității - Relativitatea specială și relativitatea generală*[314], que les théories évoluent à travers des déclarations basées sur l'observation, sous la forme de lois empiriques, à partir desquelles des lois générales sont obtenues. L'intuition et la pensée déductive jouent un rôle important dans ce processus. Après la phase initiale, l'investigateur développe un système de pensée guidée par des données empiriques, construit logiquement à partir d'hypothèses fondamentales (axiomes). La « vérité » d'une théorie résulte de sa corrélation avec un grand nombre d'observations uniques. Pour les mêmes données empiriques, plusieurs théories peuvent différer.

Einstein parle, dans *Teoria relativității - Relativitatea specială și relativitatea generală*, de la prédiction confirmée de la relativité générale (RG) pour le mouvement du *périhélie* de Mercure, avec une précision bien supérieure à celle prédite par la loi de Newton sur la gravité universelle. [315]

Une autre prédiction confirmée discutée par Einstein est la *déviation de la lumière* par un champ gravitationnel, qui admet un test expérimental par enregistrement photographique des étoiles pendant une éclipse solaire totale, ainsi : les étoiles au voisinage du soleil sont photographiées pendant une éclipse solaire. La deuxième photo des mêmes étoiles est prise lorsque le soleil est dans une position différente sur le ciel, quelques mois plus tôt ou plus tard. En comparant les positions des étoiles, elles devraient apparaître radialement vers l'extérieur. La British Royal Society et la Royal Astronomical Society ont effectué ces tests sur deux expéditions, à Sobral (Brésil) et sur l'île Principe (Afrique de l'Ouest), confirmant la prédiction.

Le déplacement des lignes spectrales vers le rouge a également été prédit par la relativité générale et discuté par Einstein dans le même livre, mais lorsque ce livre a été écrit, il n'avait pas encore été confirmé. Des expériences ont été menées sur des bandes cyanogènes, mais les résultats n'ont pas été concluants pendant cette période. Einstein a proposé une vérification du déplacement moyen des raies vers la limite le moins réfractaire du spectre, à travers des investigations statistiques des étoiles fixes.

Dans la deuxième édition du livre *Teoria relativității - Relativitatea specială și relativitatea generală*[316], Einstein déclare qu'en développant sa théorie du « problème cosmologique », il s'est appuyé sur deux hypothèses :

1. Il y a une densité moyenne de matière dans tout l'espace, qui est partout la même et différente de zéro.

[314] Albert Einstein, *Teoria relativității: Relativitatea specială și relativitatea generală* (Nicolae Sfetcu, 2017), https://books.google.ro/books?id=aMtNDwAAQBAJ.

[315] Einstein.

[316] Einstein.

2. La taille (« rayon ») de l'espace est indépendante du temps.

Les hypothèses se sont révélées conformes à la théorie générale de la relativité après l'introduction d'un terme hypothétique dans les équations de champ (« le terme cosmologique des équations de champ »). Par la suite, Einstein est parvenu à la conclusion que l'on peut garder l'hypothèse (1) sans faire appel à ce terme, si l'on peut renoncer à l'hypothèse (2) respectivement les équations initiales du champ admettent une solution dans laquelle le « rayon du monde » dépend du temps (l'expansion de l'espace), permettant ainsi l'expansion de l'espace.

Hubble, à travers une enquête sur les nébuleuses extra-galactiques, a confirmé que les raies spectrales émises montraient un décalage vers le rouge proportionnel à la distance entre les nébuleuses.

Pour Einstein, l'approche épistémologique des expériences de pensée revêtait une importance particulière. Ces expériences, par la manière dont elles ont été développées, ont offert une nouvelle compréhension des phénomènes discutés.

À seize ans, Einstein a imaginé ce qui se passerait **si un faisceau de lumière est suivi la vitesse de la lumière**[317]. L'expérience est plus difficile qu'il n'y paraît à première vue. Einstein cherchait, à cette époque, un « principe universel » qui pouvait conduire à une véritable connaissance. L'expérience commence avec l'hypothèse de suivre une onde lumineuse à la vitesse *c*. Dans ce cas d'égale amplitude des vitesses, le « surfeur » observera une onde lumineuse « gelée », avec le rayonnement lumineux comme un champ électromagnétique statique oscillant statique, et les propriétés de l'onde disparaîtraient. Mais ce champ indépendant du temps n'existe pas, car il n'est pas conforme à la théorie de Maxwell. Sa conclusion serait qu'un observateur ne peut jamais atteindre la vitesse de la lumière, l'hypothèse étant fausse par *modus tollens* dans la logique classique. Einstein a déclaré que cette expérience contient un paradoxe en ce que les deux hypothèses incluses (la constance de la vitesse de la lumière et l'indépendance des lois (donc aussi la constance de la vitesse de la lumière) du choix du système inertiel (le principe de la relativité restreinte)) sont « mutuellement incompatibles (malgré le fait que les deux sont prises séparément sont basés sur l'expérience) ».

En septembre 1905, Einstein a tenté d'étendre le principe de la relativité aux systèmes de référence accélérés en introduisant un nouveau principe physique puissant en 1907, le « principe d'équivalence » (les lois de la physique prennent la même forme dans un système uniforme d'accélération des coordonnées que dans un système qui est au repos par rapport à un champ gravitationnel homogène), avec une valeur heuristique très élevée[318]. Il a défendu ce principe à

[317] Einstein, « Autobiographische Skizze », 9-17.

[318] Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005), 179-80.

travers « **l'expérience de la pensée de l'ascenseur** », parfois considérée comme l'expérience de pensée la plus importante d'Einstein. Einstein suppose un cadre de référence accéléré avec une accélération constante dans la direction *x*, et un deuxième cadre au repos dans un champ gravitationnel homogène qui donne à tous les objets une accélération dans la même direction *x*. Sur le plan observationnel, il n'y a pas de distinction entre les deux cadres. Tous les corps sont accélérés dans le même champ gravitationnel. Ainsi, le principe d'équivalence permet de remplacer un champ gravitationnel homogène par un système de référence uniformément accéléré. Cette hypothèse de l'équivalence physique exacte des deux cadres a deux conséquences théoriques importantes : on ne peut pas parler d'une accélération absolue du système de référence, et la chute égale de tous les corps dans un champ gravitationnel.

2.4.2 Tests des théories post-einsteiniennes

Avec l'aide du formalisme PPN, les théories de la gravité sont confrontées aux résultats d'expériences dans le système solaire. Le paramètre γ dans ce formalisme met en évidence la déviation de la lumière et le retard de la lumière. Par des calculs selon PPN, la *déviation de la lumière* est obtenue par rapport aux lignes droites locales, par rapport aux tiges rigides ; en raison de la courbure de l'espace autour du Soleil, déterminée par le paramètre γ, les lignes locales droites sont courbées par rapport aux lignes droites asymptotiques à l'écart du Soleil. Le développement de l'interférométrie radioélectrique de base très longue (VLBI) a amélioré la mesure de la déviation de la lumière, permettant des observations VLBI transcontinentales et intercontinentales des quasars et des radio galaxies pour surveiller la rotation de la Terre[319]. Le satellite d'astrométrie optique Hipparcos a permis d'améliorer les performances. [320]

Les tests de *retard de la lumière* sont basés sur un signal radar envoyé sur le système solaire le long du Soleil vers une planète ou un satellite et qui, lors de son retour sur Terre, subit un retard non newtonien supplémentaire. Irwin Shapiro a découvert cet effet en 1964. Les cibles utilisées comprennent des planètes comme Mercure ou Vénus, comme réflecteurs passifs de signaux radar (radar passif), et des satellites artificiels tels que Sailors 6 et 7, Voyager 2, Viking Mars et le vaisseau spatial Cassini à Saturne, utilisé comme émetteurs de signaux radar actifs[321]. Kopeikin a suggéré, en 2001, de mesurer le retard de la lumière d'un quasar au moment du passage de la planète Jupiter[322], mesurant ainsi la vitesse de l'interaction gravitationnelle. En 2002, des mesures précises

---

[319] S. S. Shapiro et al., « Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999 », *Physical Review Letters* 92, nº 12 (26 mars 2004): 121101, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.121101.

[320] François Mignard et F. Arenou, « Determination of the ppn parameter with the hipparcos data », 1997.

[321] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

[322] Sergei M. Kopeikin, « Testing the Relativistic Effect of the Propagation of Gravity by Very Long Baseline Interferometry », *The Astrophysical Journal* 556, nº 1 (2001): L1-5,

du retard Shapiro[323] ont été effectuées. Mais plusieurs auteurs ont souligné que cet effet ne dépend pas de la vitesse de propagation de la gravité, mais uniquement de la vitesse de la lumière. [324]

L'explication des *anomalies de l'orbite de Mercure* est depuis longtemps un problème non résolu, un demi-siècle depuis l'annonce de Le Verrier en 1859. Plusieurs hypothèses *ad hoc* ont été testées pour expliquer cette incohérence avec la théorie, y compris l'existence d'une nouvelle planète Vulcaine près du Soleil, un anneau de planétoïdes, un moment solaire quadrupolaire et une déviation du carré inverse dans la loi de la gravité, mais toutes ces hypothèses ont échoué. La relativité générale a naturellement résolu ce problème.

Une autre classe d'expériences au niveau du système solaire pour la gravité vérifie le *principe d'équivalence fort* (PEF). La violation de PEF peut être testée en violant le principe d'équivalence faible pour les corps gravitationnels conduisant à des perturbations dans l'orbite Terre-Lune, l'emplacement préféré et les effets du cadre préféré dans la constance gravitationnelle mesurée localement qui pourraient produire des effets géophysiques observables et les variations possibles de la constante gravitationnelle sur le temps cosmologique. [325]

Nordtvedt[326] a également déclaré que de nombreuses théories métriques sur la gravité prédisent que les corps massifs violent le *principe d'équivalence faible* (tombant avec différentes accélérations, en fonction de leur énergie gravitationnelle). Dicke[327] note que cet effet (« l'effet Nordtvedt ») se produit dans les théories avec une constante gravitationnelle spatialement variable, comme la gravité tenseur-scalaire. L'effet Nordtvedt n'est pas remarqué dans les résultats des expériences de laboratoire, pour les objets de dimensions de laboratoire. Les analyses de données

---

https://www.academia.edu/18481905/TESTING_THE_RELATIVISTIC_EFFECT_OF_THE_PROPAGATION_OF_GRAVITY_BY_VERY_LONG_BASELINE_INTERFEROMETRY.

[323] E. B. Fomalont et S. M. Kopeikin, « The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results », *The Astrophysical Journal* 598, nº 1 (20 novembre 2003): 704-11, https://doi.org/10.1086/378785.

[324] Fintan D. Ryan, « Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments », *Physical Review D* 52, nº 10 (15 novembre 1995): 5707–5718, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.5707.

[325] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

[326] Kenneth Nordtvedt, « Equivalence Principle for Massive Bodies. I. Phenomenology », ResearchGate, 1968, 1014-16, https://www.researchgate.net/publication/243706608_Equivalence_Principle_for_Massive_Bodies_I_Phenomenology.

[327] P. G. Roll, R. Krotkov, et R. H. Dicke, « The equivalence of inertial and passive gravitational mass », *Annals of Physics* 26 (1 février 1964): 26, 442–517, https://doi.org/10.1016/0003-4916(64)90259-3.

n'ont trouvé aucune preuve, dans l'incertitude expérimentale, de l'effet Nordtvedt[328]. Dans le RG, l'effet Nordtvedt disparaît. [329]

Certaines théories violent le principe de l'équivalence faible en prédisant que les résultats des expériences gravitationnelles locales peuvent dépendre de la vitesse du laboratoire par rapport au cadre de repos moyen de l'univers (les *effets du cadre préféré*, correspondant aux paramètres PPN $\alpha 1$, $\alpha 2$ et $\alpha 3$) ou à l'emplacement du laboratoire par rapport à un corps gravitationnel à proximité (*effets de localisation préférés*, certains étant régis par le paramètre PPN ξ) [330]. Les effets consistent en variations et anisotropies de la valeur localement mesurée de la constante gravitationnelle conduisant à l'apparition de valeurs anormales de la Terre et de variations de la vitesse de rotation de la Terre, de contributions anormales à la dynamique orbitale des planètes et de la Lune, d'auto-accélérations des impulsions et des moments anormaux du Soleil qui détermineraient l'orientation aléatoire de son axe de rotation vers l'écliptique. [331]

La plupart des théories qui violent le principe d'équivalence faible prédisent une variation de la constante gravitationnelle newtonienne mesurée localement, en fonction du temps.

D'autres tests pour vérifier les théories gravitationnelles sont basés sur le *gravitomagnétisme* (la matière en mouvement ou en rotation produit un champ gravitationnel supplémentaire analogue au champ magnétique d'une charge en mouvement ou d'un dipôle magnétique). Les effets relativistes mesurables concernent le système Terre-Lune et les systèmes des pulsars binaires. [332]

Les expériences au *gyroscope* tentent de détecter cette précession des cadres ou l'effet Lense-Thirring. Une autre façon de tester la précession Lense-Thirring consiste à mesurer la précision des plans orbitaux des corps qui tournent sur un corps en rotation, en mesurant la précession relative[333].

---

[328] James G. Williams, Slava G. Turyshev, et Dale H. Boggs, « Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity », *Physical Review Letters* 93, nº 26 (29 décembre 2004): 261101, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.261101.

[329] Kenneth Nordtvedt, « The Relativistic Orbit Observables in Lunar Laser Ranging », ResearchGate, 1995, 51–62, 114, https://www.researchgate.net/publication/223758280_The_Relativistic_Orbit_Observables_in_Lunar_Laser_Ranging.

[330] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

[331] Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

[332] K. Nordtvedt, « Gravitomagnetic interaction and laser ranging to Earth satellites », *Physical Review Letters* 61, nº 23 (5 décembre 1988): 61, 2647–2649, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2647.

[333] John C Ries et al., « Prospects for an Improved Lense-Thirring Test with SLR and the GRACE Gravity Mission », s. d., 7.

Le système Terre-Lune peut être considéré comme un « gyroscope », avec l'axe perpendiculaire au plan orbital.

Une valeur non nulle pour l'un des paramètres PPN *ζ1*, *ζ2, ζ3*, *ζ4* et *α3* entraînerait une violation de la *conservation* de la quantité de mouvement ou de de la troisième loi de Newton dans les systèmes gravitationnels. Un test pour la troisième loi de Newton pour les systèmes gravitationnels a été effectué en 1968 par Kreuzer, dans lequel l'attraction gravitationnelle du fluor et du brome a été comparée avec une précision de 5 parties sur 10^5. Un test planétaire a été rapporté par Bartlett et van Buren[334]. Une autre conséquence de la violation de la conservation de la quantité de mouvement est une auto-accélération du centre de masse d'un système binaire stellaire.

Le formalisme PPN n'est plus valable pour les champs gravitationnels puissants (étoiles à neutrons, trous noirs), mais dans certains cas, des approximations post-newtoniennes peuvent être faites. Les systèmes dans des champs gravitationnels forts sont affectés par l'émission de rayonnement gravitationnel. Par exemple, un mouvement orbital relativiste (fusion ou effondrement de systèmes d'étoiles à neutrons binaires ou de trous noirs dans la phase finale) peut être détecté par un réseau d'observateurs avec des ondes d'interférence gravitationnelles avec un interféromètre laser, mais l'analyse se fait en utilisant différentes techniques.

Seuls deux paramètres peuvent être utilisés pour observer la génération et le déplacement des ondes gravitationnelles : la quantité de mouvement de masse et le moment angulaire. Les deux quantités peuvent être mesurées, en principe, en examinant le champ gravitationnel externe des corps sans aucune référence à leur intérieur. Damour[335] appelle cela un « effacement » de la structure interne du corps.

Une autre façon de vérifier l'accord avec la RG est de comparer la phase observée de l'orbite avec la phase théorique du modèle en fonction du temps.

L'observation des ondes gravitationnelles peut fournir les moyens de tester les prévisions relativistes générales pour la polarisation et la vitesse des obdes, pour amortir le rayonnement gravitationnel et pour la gravité des champs forts, en utilisant des détecteurs d'ondes gravitationnelles avec interféromètre ou bande résonante. Les interféromètres laser à large bande sont particulièrement sensibles à l'évolution des phases des ondes gravitationnelles, qui véhiculent des informations sur l'évolution de la phase orbitale.

---

[334] D. F. Bartlett et Dave Van Buren, « Equivalence of active and passive gravitational mass using the moon », *Physical Review Letters* 57, nº 1 (7 juillet 1986): 21–24, 57, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.21.

[335] T. Damour, « The problem of motion in Newtonian and Einsteinian gravity. », in *Three Hundred Years of Gravitation*, 1987, 128-98, http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..128D.

Une autre possibilité implique des ondes gravitationnelles d'une petite masse orbitant en spirale dans un trou noir. [336]

L'un des problèmes pris en compte par les physiciens dans les tests de la RG dans le champ fort est la possibilité de contamination par une physique incertaine ou complexe. Par exemple, quelques secondes après le Big Bang, la physique est relativement claire, mais certaines théories de la gravité ne parviennent pas à produire des cosmologies qui répondent même aux exigences minimales pour la nucléosynthèse du big-bang ou aux propriétés du fond cosmique des micro-ondes[337]. Mais, dans de modestes incertitudes, on peut évaluer la différence quantitative entre les prédictions et les autres théories dans des conditions de champ fortes en les comparant aux observations. [338]

2.4.3 Tests classiques

Albert Einstein a proposé[339] trois tests de relativité générale, appelés plus tard les **tests classiques de relativité générale**, en 1916 :

1. Précession de l'orbite de Mercure
2. Déviation de la lumière du soleil
3. Décalage vers le rouge gravitationnel de la lumière.

Pour les tests gravitationnels, les effets indirects de la gravité sont toujours utilisés, généralement des particules qui sont influencées par la gravité. En présence de la gravité, les particules se déplacent le long de lignes géodésiques courbes. Les sources de gravité qui provoquent la courbure de l'espace-temps sont des corps matériels, en fonction de leur masse. Mais en relativité la masse se rapporte à l'énergie par la formule $E = mc^2$, et l'énergie à la quantité de mouvement, selon la relativité restreinte.

Les équations d'Einstein donnent la relation entre la géométrie spatiale et les propriétés de la matière, en utilisant la géométrie riemannienne, les propriétés géométriques étant décrites par une fonction appelée métrique. En relativité générale, la métrique de courbure de Riemann et le tenseur prennent des valeurs définies à chaque point de l'espace-temps. Le contenu de la matière définit une grandeur appelée le tenseur énergie-impulsion *T*. Ces quantités sont liées les unes aux autres par les équations d'Einstein, dans lesquelles le tenseur de courbure de Riemann et la métrique

---

[336] Ryan, « Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments », 52, 5707–5718.

[337] Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, chap. 13.2.

[338] Clifford M. Will, *Was Einstein Right?: Putting General Relativity To The Test*, 2 edition (New York, NY: Basic Books, 1993).

[339] Einstein, « The foundation of the general theory of relativity », 769–822.

définissent une autre grandeur géométrique *G*, appelée le tenseur d'Einstein, qui décrit certains aspects du mode dans quel espace-temps est courbé. L'équation d'Einstein déclare ainsi que

$$\mathbf{G} = (8\pi G/c4)\cdot\mathbf{T},$$

où **G** mesure la courbure et **T** mesure la quantité de matière. *G* est la constante gravitationnelle de la gravité newtonienne et *c* est la vitesse de la lumière en relativité restreinte. Chacune des valeurs **G** et **T** est déterminée par plusieurs fonctions des coordonnées espace-temps, ce qui donne en fait plus d'équations, en fait. Chaque solution de ces équations décrit une certaine géométrie de l'espace-temps.

2.4.3.1 La précession du périhélie de Mercure

Urbain Le Verrier a découvert, en 1859, que la précession orbitale de la planète Mercure ne correspond pas à la théorie : l'ellipse de son orbite tourne (précession) légèrement plus vite, la différence étant d'environ 38 (corrigée par la suite à 43) arcsecondes de rotation par siècle[340]. Plusieurs hypothèses *ad hoc* ont été proposées, telles que la poussière interplanétaire, l'oblation non observée du Soleil, un mois non détecté par Mercure, ou une nouvelle planète appelée Vulcan. Comme aucune hypothèse n'a été confirmée, il a été supposé que la loi de gravité de Newton soit incorrecte, enessayant de changer la loi, mais les nouvelles théories étaient en contradiction avec d'autres lois. Dans la relativité générale, cette précession s'explique par la gravité médiée par la courbure de l'espace, en accord avec l'observation.

2.4.3.2 La déviation de la lumière

La prédiction de la déviation de la lumière a d'abord été confirmée par l'observation de la lumière des étoiles (quasars) déviées lors de leur passage à travers le Soleil[341]. Dans le formalisme PPN, la déviation de la lumière est mise en évidence par le paramètre γ, qui code l'influence de la gravité sur la géométrie de l'espace. [342]

La déviation de la lumière par un objet massif est prévue depuis 1784 par Henry Cavendish et Johann Georg von Soldner en 1801, sur la base des calculs à partir de la gravité newtonienne. Cette

---

[340] U. Le Verrier, *Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète, in Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* (Paris : Gauthier-Villars, 1859), 379–383, http://archive.org/details/comptesrendusheb49acad.

[341] Daniel Kennefick et Jürgen Renn, *Astronomers Test General Relativity: Light-bending and the Solar Redshift, in Albert Einstein - Chief Engineer of the Universe: 100 Authors for Einstein Essays*, 2005, http://adsabs.harvard.edu/abs/2005alei.book.....R.

[342] Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

prédiction a été confirmée par Einstein en 1911, corrigeant la valeur de la courbure en 1915 sur la base de la relativité générale[343]. La première observation de la déviation de la lumière a été faite par Arthur Eddington lors de l'éclipse totale de soleil du 29 mai 1919, simultanément à Sobral, au Brésil et à São Tomé et Príncipe sur la côte ouest de l'Afrique. [344]

La déviation de la lumière dans le cas relativiste général n'est observé que pour un observateur stationnaire qui voit le chemin de la lumière par rapport à un corps gravitationnel. Einstein a compris, en utilisant le PEE (principe d'équivalence d'Einstein), que la masse ou même l'énergie dans la formule d'Eisntein suivrait des chemins géodésiques dans l'espace-temps, en relation avec un observateur au repos avec le corps gravitationnel. Ce résultat met en évidence l'essence du PEE, montrant que la gravité et l'accélération ne peuvent pas être différenciées l'une de l'autre, dans une petite région. Shapiro et al. [345] ont rapporté la courbure, par le soleil, des ondes radio émises par des sources radio extragalactiques, entre 1979 et 1999.

2.4.3.3 Le décalage vers le rouge gravitationnel

Le décalage vers le rouge gravitationnel apparaît lorsque le rayonnement électromagnétique d'une source dans un champ gravitationnel est observé à partir d'une région avec un potentiel gravitationnel plus élevé. C'est un résultat direct de l'expansion du temps gravitationnel. Dans un test pour confirmer cet effet, la réception de la lumière doit être située à un potentiel gravitationnel plus élevé. Si l'observateur a un potentiel gravitationnel inférieur à la source, il remarquera un décalage gravitationnel vers le bleu.

Einstein a prédit l'effet du principe d'équivalence en 1907, déclarant qu'il peut être mesuré dans les raies spectrales d'une étoile naine blanche qui a un très grand champ gravitationnel. La première mesure précise d'une naine blanche a été effectuée par Popper en 1954. [346]

---

[343] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

[344] Matthew Stanley, « “An Expedition to Heal the Wounds of War” The 1919 Eclipse and Eddington as Quaker Adventurer », *Isis* 94, nº 1 (1 mars 2003): 57–89, https://doi.org/10.1086/376099.

[345] Shapiro et al., « Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999 ».

[346] N. S. Hetherington, « Sirius B and the Gravitational Redshift: An Historical Review », ResearchGate, 1980, 246-52, https://www.researchgate.net/publication/234478409_Sirius_B_and_the_gravitational_redshift_An_historical_review.

Le système de positionnement global (GPS) doit prendre en compte le décalage vers le rouge gravitationnel dans la synchronisation[347]. Les physiciens ont analysé les données GPS pour confirmer d'autres tests[348]. D'autres tests de précision sont le satellite Gravity Probe A, lancé en 1976, et l'expérience Hafele-Keating qui utilisait des horloges atomiques dans des avions de navigation. [349]

2.4.4 Tests modernes

Dicke et Schiff ont établi un cadre pour tester la relativité générale[350], y compris par le biais d'expériences nulles et en utilisant la physique de l'exploration spatiale, de l'électronique et de la matière condensée, comme l'expérience Pound-Rebka et l'interférométrie laser. Les tests des lentilles gravitationnelles et le retard temporel de la lumière sont mis en évidence par le paramètre γ du formalisme PPN, égal à un pour la relativité générale et avec des valeurs différentes dans d'autres théories. La mission BepiColombo a visé à tester la théorie générale de la relativité en mesurant les paramètres gamma et bêta du formalisme PPN. [351]

2.4.4.1 Le retard Shapiro

Le retard gravitationnel (retard Shapiro), selon lequel les signaux lumineux nécessitent plus de temps pour traverser un champ gravitationnel qu'en l'absence de ce champ, a été testé avec succès[352]. Dans le formalisme PPN, le retard gravitationnel est mis en évidence par le paramètre γ, qui encode l'influence de la gravité sur la géométrie de l'espace. [353]

Irwin I. Shapiro a proposé que ce test devienne « classique », prédisant un retard relativiste dans le retour des signaux radar réfléchis sur d'autres planètes. L'utilisation des planètes Mercure et Vénus comme cibles avant et après leur éclipse par le Soleil a confirmé la théorie de la relativité

---

[347] Le GPS est testé en continu en comparant les horloges atomiques au sol et sur les satellites en orbite, pour la corrélation avec les effets relativistes, cf. NeilNeil Ashby, « Relativity in the Global Positioning System », Living Reviews in Relativity 6, no. 1 (28 janvier 2003): 1, https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1.

[348] Neil Ashby, « Relativity in the Global Positioning System », *Living Reviews in Relativity* 6, nº 1 (28 janvier 2003): 1, https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1.

[349] S Schiller, « Gravitational Physics with Optical Clocks in Space », 2015, 31.

[350] Schiff, « On Experimental Tests of the General Theory of Relativity », 340–343.

[351] Brans et Dicke, « Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation », 925–935.

[352] Shapiro, « Fourth Test of General Relativity », 789–791.

[353] Irwin I. Shapiro et al., « Fourth Test of General Relativity: New Radar Result », *Physical Review Letters* 26, nº 18 (3 mai 1971): 1132–1135, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1132.

générale[354]. Plus tard, la sonde Cassini a été utilisée pour une expérience similaire[355]. La mesure du paramètre gamma PPN est affectée par l'effet gravitomagnétique provoqué par le mouvement orbital du Soleil autour du centre du système solaire. L'interférométrie de base très longue a permis de corriger cet effet dans le champ de mouvement de Jupiter[356] et de Saturne.[357]

2.4.4.2 La dilatation gravitationnelle du temps

La gravité influence le passage du temps. Les processus proches d'un corps massif sont plus lents[358]. Le décalage gravitationnel vers le rouge a été mesuré en laboratoire[359] et à l'aide d'observations astronomiques.[360] La dilatation du temps gravitationnel dans le champ gravitationnel de la Terre a été mesurée à l'aide d'horloges atomiques[361], vérifiée comme effet secondaire du fonctionnement du système de positionnement global (GPS)[362]. Les tests dans des champs gravitationnels plus forts nécessitent des pulsars binaires[363]. Tous les résultats sont conformes à la relativité générale, mais aussi à d'autres théories où le principe d'équivalence est valable.[364]

La dilatation gravitationnelle du temps coexiste avec l'existence d'un référentiel accéléré, à l'exception du centre d'une distribution concentrique de la matière dans laquelle il n'y a pas de référentiel accéléré, bien que l'on suppose qu'ici le temps est dilaté[365]. Dans tous ces cas, les

---

[354] Shapiro et al., 1132–1135.

[355] Sergei M. Kopeikin et Edward B. Fomalont, « Gravimagnetism, Causality, and Aberration of Gravity in the Gravitational Light-Ray Deflection Experiments », *General Relativity and Gravitation* 39, nº 10 (1 octobre 2007): 1583–1624, https://doi.org/10.1007/s10714-007-0483-6.

[356] Kopeikin et Fomalont, 1583–1624.

[357] Ed Fomalont et al., « Recent VLBA/VERA/IVS Tests of General Relativity », *Proceedings of the International Astronomical Union* 5, nº S261 (avril 2009): 291–295, https://doi.org/10.1017/S1743921309990536.

[358] Misner, Thorne, et Wheeler, *Gravitation*.

[359] Pound et Rebka, « Apparent Weight of Photons », 186.

[360] Misner, Thorne, et Wheeler, *Gravitation*.

[361] Hans C. Ohanian et Remo Ruffini, *Gravitation and Spacetime* (Norton, 1994).

[362] Ashby, « Relativity in the Global Positioning System ».

[363] Michael Kramer, « Millisecond Pulsarsas Tools of Fundamental Physics », in *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants*, éd. par Savely G. Karshenboim et Ekkehard Peik, Lecture Notes in Physics (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004), 33–54, https://doi.org/10.1007/978-3-540-40991-5_3.

[364] Ohanian et Ruffini, *Gravitation and Spacetime*.

[365] Einstein a dérivé ces effets en utilisant le principe d'équivalence dès 1907, cf. Albert Einstein, »Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben geezogene Folgerungen, in Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909 Page 432 (468 of 692).) », 1907, 411, https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-doc/468.

phénomènes physiques subissent la même dilatation du temps, conformément au principe d'équivalence. La dilatation du temps peut être mesurée pour les photons qui sont émis sur la Terre, se courbent près du Soleil, se réfléchissent sur Vénus et reviennent sur Terre le long d'un chemin similaire. On observe que la vitesse de la lumière au voisinage du Soleil est inférieure à *c*. Le phénomène a été mesuré expérimentalement à l'aide d'horloges atomiques dans l'avion, où des dilatations temporelles se produisent et en raison des différences d'hauteurs inférieures à 1 mètre, et ont été expérimentalement vérifiées en laboratoire[366]. D'autres modes de test sont à travers l'expérience Pound-Rebka, des observations des spectres nains blancs Sirius B et des expériences avec des signaux temporels envoyés vers et depuis le sol de Mars avec le Viking 1.

2.4.4.3 L'effet Lense-Thirring et l'effet géodésique

En relativité générale, les absides des orbites (le point sur l'orbite du corps le plus proche du centre de masse du système) auront une précession, formant une orbite différente d'une ellipse, la forme de la rose. Einstein a prédit ce mouvement. Des précessions relativistes ont été observées pour toutes les planètes qui permettent des mesures précises de la précession (Mercure, Vénus et la Terre) [367], et dans les systèmes pulsar binaires où elle est plus grande de cinq ordres de grandeur.

Un système binaire qui émet des ondes gravitationnelles perd de l'énergie. Ainsi, la distance entre les deux corps orbitaux diminue, tout comme leur période orbitale. Au niveau du système solaire, l'effet est difficile à observer. Il est observable pour un pulsar presque binaire, à partir duquel des impulsions radioélectriques de fréquence très précises sont reçues, permettant des mesures de la période orbitale. Les étoiles à neutrons émettent de grandes quantités d'énergie sous forme de rayonnement gravitationnel. La première observation de cet effet est due à Hulse et Taylor, utilisant un pulsar binaire PSR1913+16 découvert en 1974. Il s'agissait de la première détection indirecte d'ondes gravitationnelles. [368]

La relativité de la direction a plusieurs effets relativistes[369], comme la précession géodésique : la direction de l'axe d'un gyroscope en chute libre dans un espace courbe va changer par rapport à la direction de la lumière reçue des étoiles lointaines[370]. Pour le système Lune-Terre, cet effet a été

---

[366] Pound et Rebka, « Apparent Weight of Photons », 186.

[367] Ohanian et Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, 406-7.

[368] Hulse et Taylor, « Discovery of a pulsar in a binary system », L51–L55.

[369] Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Reprint edition (New York: Vintage, 2007).

[370] Ohanian et Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sect. 7.8.

mesuré à l'aide du laser réfléchi sur la Lune[371], et plus récemment à l'aide des masses d'essai à bord de la sonde Gravity Probe B. [372]

Près d'une mass rotative, il y a des effets gravitométriques ou Lense-Thirring. Dans le cas de trous noirs rotatifs, tout objet qui pénètre dans l'ergosphère tourne. L'effet peut être testé par son influence sur l'orientation des gyroscopes à chute libre[373]. Des tests ont été effectués à l'aide des satellites LAGEOS[374], avec la sonde Mars Global Surveyor autour de Mars[375], confirmant la prédiction relativiste.

Le premier effet Lense-Thirring a été dérivé en 1918, par Josef Lense et Hans Thirring et est connu sous leurs noms. Ils ont prédit que la rotation d'un objet massif déformerait la métrique espace-temps, provoquant la précession de l'orbite d'une particule d'essai à proximité. Pour le détecter, il faut examiner un objet très massif ou construire un instrument très sensible. L'effet Lense-Thirring linéaire apparaît en appliquant le principe de la RG à la quantité de mouvement. C'est très difficile à vérifier[376]. L'augmentation de la masse statique est un autre effet, une augmentation de l'inertie d'un corps lorsque d'autres masses sont placées à proximité. Einstein déclare qu'elle dérive de la même équation de la relativité générale. C'est un petit effet, difficile à confirmer expérimentalement.

Plusieurs propositions coûteuses ont été faites[377], notamment en 1976 par Van Patten et Everitt, pour une mission spatiale spéciale visant à mesurer la précession Lense-Thirring d'une paire de véhicules spatials devant être placés sur des orbites polaires de la Terre avec des dispositifs sans l'effet Lense-Thirring. En 1986, Ciufolini a proposé le lancement d'un satellite géodésique passif

---

[371] Kenneth Nordtvedt, « Lunar Laser Ranging - a comprehensive probe of post-Newtonian gravity », *arXiv:gr-qc/0301024*, 7 janvier 2003, http://arxiv.org/abs/gr-qc/0301024.

[372] C. W. F. Everitt et al., « Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity », *Physical Review Letters* 106, nº 22 (31 mai 2011): 221101, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.221101.

[373] Ohanian et Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sect. 4.7.

[374] Lorenzo Iorio, « An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging », *Space Science Reviews* 148, nº 1-4 (décembre 2009): 363–381, https://doi.org/10.1007/s11214-008-9478-1.

[375] Lorenzo Iorio, « On the Lense-Thirring test with the Mars Global Surveyor in the gravitational field of Mars », *Open Physics* 8, nº 3 (1 janvier 2010): 509–513, https://doi.org/10.2478/s11534-009-0117-6.

[376] Albert Einstein, « The Meaning of Relativity », Princeton University Press, 1921, https://press.princeton.edu/titles/484.html.

[377] R. A. Van Patten et C. W. F. Everitt, « Possible Experiment with Two Counter-Orbiting Drag-Free Satellites to Obtain a New Test of Einstein's General Theory of Relativity and Improved Measurements in Geodesy », *Physical Review Letters* 36, nº 12 (22 mars 1976): 629–632, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.629.

sur une orbite identique à celle du satellite LAGEOS. Les tests ont commencé en 1996 avec les satellites LAGEOS et LAGEOS II. [378] La précision des tests est controversée. L'expérience avec Gravity Probe B n'a pas non plus atteint la précision souhaitée. [379]

Dans le cas des étoiles en orbite près d'un trou noir supermassif, l'effet Lense-Thirring devrait provoquer la précession du plan orbital de l'étoile autour de l'axe de rotation du trou noir, un effet qui pourrait être détecté par la suite par une surveillance astrométrique des étoiles au centre de la galaxie la Voie lactée. [380]

Des jets relativistes peuvent fournir des preuves pour l'effet Lense-Thirring[381]. Le modèle gravitomagnétique développé par Reva Kay Williams prédit les particules de haute énergie émises par les quasars et les noyaux galactiques actifs, l'extraction des rayons X et γ et des paires relativistes e-e +, les jets collimatés autour de l'axe polaire et la formation de jets asymétriques.

2.4.4.4 Tests du principe d'équivalence

Au début du XVIIe siècle, Galileo a développé un principe similaire à celui de l'équivalence lorsqu'il a montré expérimentalement que l'accélération d'un corps due à la gravité est indépendante de sa masse. Kepler a souligné le principe d'équivalence à travers une expérience de pensée, ce qui se passerait si la lune était arrêtée en orbite et tombée sur Terre.

Le principe d'équivalence a historiquement joué un rôle important dans la loi de la gravité. Newton l'a examiné dès le premier paragraphe du *Principia*. Einstein s'est également appuyé sur ce principe en relativité générale. Le principe d'équivalence de Newton stipule que la « masse » d'un corps est proportionnelle à son « poids » (le **principe d'équivalence faible**, PEFa). Une autre définition du PEFa est que la trajectoire d'un corps en l'absence de forces est indépendante de sa structure et de sa composition internes. Un test PES simple est la comparaison de l'accélération de deux corps de composition différente dans un champ gravitationnel externe. D'autres expériences de haute précision comprennent les expériences de pendule de Newton, Bessel et Potter aux mesures de

---

[378] Iorio, « An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging », 363–381.

[379] Everitt et al., « Gravity Probe B ».

[380] Ohanian et Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sect. 7.8.

[381] Pour un observateur distant, les jets semblent parfois se déplacer plus rapidement que la lumière, mais il s'agit d'une illusion d'optique qui ne viole pas les principes de la relativité.

torsion classiques d'Eotvos[382], Dicke[383] et Braginsky[384]. Il existe plusieurs projets pour améliorer les valeurs mesurées à l'aide de satellites.

Le **principe d'équivalence d'Einstein** (PEE) est plus fort et plus complet, déclarant que le PEFa est valide, et les résultats des expériences locales non gravitationnelles sont indépendants des vitesses des cadres de référence appropriés et du lieu et du temps où ils sont effectués. L'indépendance du cadre de référence est appelée invariance de Lorentz locale, et l'indépendance de sa structure et de sa composition internes est appelée invariance de position locale.

La relativité restreinte a bénéficié d'une série d'expériences qui ont par la suite contribué à l'acceptation de la RG :

- L'expérience Michelson-Morley et les expériences équivalentes ultérieures, [385]
- Les tests Ives-Stillwell, Rossi-Hall, autres tests de dilatation du temps, [386]
- L'indépendance de la vitesse de la lumière par rapport à la vitesse de la source, en utilisant des sources stellaires binaires à rayons X et des pions à haute énergie, [387]
- L'isotropie de la vitesse de la lumière. [388]

Ces dernières années, les scientifiques ont commencé à rechercher des violations apparentes de l'invariance de Lorentz résultant de certains modèles de gravité quantique. Une modalité simple, incarnée dans le formalisme c2, suppose que les interactions électromagnétiques subissent une légère violation de l'invariance de Lorentz en modifiant la vitesse du rayonnement électromagnétique *c* par rapport à la vitesse limite de la particule testant les particules[389], en essayant de sélectionner un cadre de repos universel, possible du rayonnement de fond

---

[382] Roland V. Eötvös, Desiderius Pekár, et Eugen Fekete, « Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität », *Annalen der Physik* 373 (1922): 11–66, 68, https://doi.org/10.1002/andp.19223730903.

[383] R. H. Dicke, *Gravitation and the universe.*, 1969, http://adsabs.harvard.edu/abs/1969grun.book.....D.

[384] V. B. Braginsky et V. I. Panov, « Verification of the equivalence of inertial and gravitational mass », *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics* 34 (1972): 34, 463–466, https://istina.msu.ru/publications/article/4687588/.

[385] A. Brillet et J. L. Hall, « Improved laser test of the isotropy of space », *Physical Review Letters* 42 (1 février 1979): 42, 549–552, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.42.549.

[386] F. J. M. Farley et al., « The Anomalous Magnetic Moment of the Negative Muon », *Il Nuovo Cimento A (1965-1970)* 45, nº 1 (1 septembre 1966): 45, 281–286, https://doi.org/10.1007/BF02738104.

[387] T. Alväger et al., « Test of the second postulate of special relativity in the GeV region », *Physics Letters* 12, nº 3 (1 octobre 1964): 12, 260–262, https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91095-9.

[388] null Krisher et al., « Test of the Isotropy of the One-Way Speed of Light Using Hydrogen-Maser Frequency Standards », *Physical Review. D, Particles and Fields* 42, nº 2 (15 juillet 1990): 42, 731–734.

[389] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

cosmique[390]. Grâce aux expériences de Michelson-Morley, la vitesse de la lumière est vérifiée ; l'expérience Brillet-Hall[391] a utilisé un interféromètre laser Fabry-Perot ; dans d'autres expériences, les fréquences des oscillateurs de la cavité électromagnétique dans différentes orientations ont été comparées entre elles ou avec les horloges atomiques, selon l'orientation du laboratoire. [392]

Le principe de l'invariance de la position locale peut être testé par l'expérience de décalage vers le rouge gravitationnel. Les premières expériences de ce type ont été la série Pound-Rebka-Snider de 1960 à 1965, qui a mesuré la variation de fréquence des photons de rayonnement gamma. Le test standard de décalage vers le rouge le plus précis était l'expérience de fusée Vessot-Levine de juin 1976[393]. Une expérience de décalage vers le rouge « nul » menée en 1978 a testé si le taux relatif de deux horloges différentes dépend de la position. Les expériences les plus récentes ont utilisé des techniques de refroidissement et de capture laser et de fixation d'atomes pour obtenir une stabilité d'horloge extrême et ont comparé la transition hyperfin rubidium-87[394], la transition quadripôle ionique mercure-199[395], la transition atomique avec hydrogène 1S-2S[396], ou une transition optique en ytterbium-171[397], contre une transition hyperfine au niveau du sol en césium-133[398].

Le principe de l'équivalence d'Einstein fait partie du noyau dur du programme de recherche d'Einstein, car l'existence du PEE implique la gravité comme un phénomène dans « l'espace-temps

---

[390] C. H. Lineweaver et al., « The Dipole Observed in the COBE DMR 4 Year Data », *The Astrophysical Journal* 470 (1 octobre 1996): 470, 38–42, https://doi.org/10.1086/177846.

[391] Brillet et Hall, « Improved laser test of the isotropy of space », 42, 549–552.

[392] Paul L. Stanwix et al., « Test of Lorentz Invariance in Electrodynamics Using Rotating Cryogenic Sapphire Microwave Oscillators », *Physical Review Letters* 95, nº 4 (21 juillet 2005): 040404, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.040404.

[393] R. F. C. Vessot et al., « Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser », *Physical Review Letters* 45, nº 26 (29 décembre 1980): 45, 2081–2084, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.2081.

[394] H. Marion et al., « A Search for Variations of Fundamental Constants using Atomic Fountain Clocks », *Physical Review Letters* 90, nº 15 (18 avril 2003): 90, 150801–1–4, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150801.

[395] S. Bize et al., « Testing the stability of fundamental constants with the 199Hg+ single-ion optical clock », *Physical Review Letters* 90, nº 15 (18 avril 2003): 90, 150802–1–4, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150802.

[396] M. Fischer et al., « New Limits to the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements », *Physical Review Letters* 92, nº 23 (10 juin 2004): 92, 230802–1–4, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.230802.

[397] E. Peik et al., « New limit on the present temporal variation of the fine structure constant », *Physical Review Letters* 93, nº 17 (18 octobre 2004): 93, 170801–1–4, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.170801.

[398] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

courbe ». Il s'avère que les seules théories de la gravité qui peuvent pleinement intégrer le PEE sont celles qui satisfont respectivement aux postulats des « théories métriques de la gravité »: [399]

1. L'espace a une valeur symétrique.
2. Les trajectoires des corps en chute libre sont géodésiques de cette métrique.
3. Dans les cadres de référence locaux en chute libre, les lois non gravitationnelles de la physique sont celles écrites dans le langage de la relativité restreinte.

En 1960, Schiff a développé l'hypothèse selon laquelle toute théorie de gravité complète et cohérente qui incarne le PEFa incarne nécessairement le PEE (la validité du PEFa elle-même garantit la validité des invariants et de la position de Lorentz locaux). Dans ce cas, il s'ensuit, sur la base de l'hypothèse de conservation d'énergie, que les expériences Eotvos sont des bases empiriques directes pour le PEE. Lightman et Lee[400] ont fait la première tentative réussie de prouver plus formellement la conjecture de Schiff, en utilisant un cadre appelé « formalisme THεμ » qui inclut toutes les théories métriques de la gravité et de nombreuses théories non métriques, qui utilisent le taux de chute d'un corps « testé » composé de particules chargées interagissant.

Des preuves empiriques à l'appui du principe d'équivalence d'Einstein indiquent que les seules théories de la gravité qui espèrent être viables sont les théories métriques, ou peut-être les théories métriques en dehors des couplages non métriques très faibles ou de courte durée (comme en la théorie des cordes). [401]

Il peut y avoir d'autres champs gravitationnels en plus des champs métriques, tels que les champs scalaires ou vectoriels, qui déterminent comment la matière et les champs non gravitationnels génèrent des champs gravitationnels et produisent la métrique ; mais une fois que la métrique est déterminée, elle n'agit qu'en arrière de la manière prescrite par le PEE. Ainsi, toutes les théories métriques de la gravité peuvent être divisées en deux classes fondamentales : « purement dynamique » et « précédemment géométrique » [402]. Dans une « théorie métrique purement dynamique », les champs gravitationnels ont la structure et l'évolution déterminées par les équations de champ différentiel partiellement couplées. Une théorie « précédemment géométrique » contient des « éléments absolus », des champs ou des équations dont la structure et l'évolution sont données *a priori* et sont indépendantes de la structure et de l'évolution des autres domaines de la théorie. La relativité générale est une théorie purement dynamique.

---

[399] Will.

[400] A. P. Lightman et D. L. Lee, « Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle », *Physical Review. D, Particles Fields* 8, nº 2 (1973): 8, 364–376, http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:5098997.

[401] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

[402] Will.

Le **principe d'équivalence fort** (PEFo) stipule que : PEFa est valable pour tous les corps, et le résultat de toute expérience de test locale est indépendant de la vitesse de l'appareil et du lieu et de l'heure de l'expérience.

Comparé au PEFa, le PEFo comprend des sources gravitationnelles (planètes, étoiles) et des expériences impliquant des forces gravitationnelles (expériences Cavendish, mesures gravimétriques). Notez que PEFa inclut le PEE comme cas spécial où les forces gravitationnelles locales sont ignorées. Si PEFa est strictement valide, il ne doit y avoir qu'un seul champ gravitationnel dans l'univers, la métrique *g*, mais il n'y a jusqu'à présent aucune preuve rigoureuse de cette affirmation.

Le principe de l'équivalence d'Einstein peut être testé, en plus des tests PEFa, en recherchant la variation des constantes sans dimension et des rapports de masse.

Le PEFo implique que la gravité est de nature géométrique et ne contient pas de champs associés supplémentaires. Ainsi, PEFo dit qu'une mesure d'une surface d'espace plat est absolument équivalente à toute autre surface d'espace plat dans n'importe quelle autre partie de l'univers. La théorie de la relativité générale d'Einstein est la seule théorie de la gravité qui satisfait au principe fort de l'équivalence.

PEFo peut être testé en recherchant une variation de la constante gravitationnelle *G* de Newton, ou une variation de la masse des particules fondamentales. Celles-ci résulteraient d'écarts par rapport à la loi de la force gravitationnelle de la relativité générale, en particulier des écarts par rapport à la proportionnalité quadratique inverse, ce qui peut s'expliquer par l'existence de la cinquième force. D'autres effets recherchés sont l'effet Nordtvedt, une « polarisation » des orbites du système solaire due à l'accélération gravitationnelle de l'auto-génération à un rythme différent de la matière normale, recherchée par l'expérience Lunar Laser Ranging. D'autres tests comprennent l'étude de la déviation du rayonnement provenant de sources radioélectriques éloignées du soleil mesuré avec une interférométrie de base très longue, ou la mesure du changement de fréquence des signaux vers et depuis le vaisseau spatial Cassini.

Les théories quantiques de la gravité, telles que la théorie des cordes et la gravité quantique en boucles, prévoient des violations du principe d'équivalence faible. Actuellement, les tests du principe d'équivalence faible ont un certain degré de sensibilité de sorte que la non-détection d'une violation est aussi profonde que la découverte d'une violation. Découvrir la violation du principe d'équivalence fournirait un guide important pour l'unification. [403]

---

[403] James Overduin et al., « The Science Case for STEP », *Advances in Space Research* 43, nº 10 (15 mai 2009): 1532–1537, https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.02.012.

Un formalisme des lois non gravitationnelles de la physique en présence de la gravité qui intègre la possibilité d'un couplage non métrique (non universel) et métrique, est le formalisme TH conçu par Lightman et Lee[404]. Il permet une prévision quantitative des résultats de l'expérience.

2.4.4.5 Tests du système solaire

L'environnement dynamique de l'espace-temps autour de la Terre permet de tester des théories gravitationnelles, avec des satellites géodésiques comme masses d'essai. Les satellites LAGEOS, lancés à des fins géodésiques et géodynamiques, et pour des études physiques fondamentales, en sont un exemple. Les satellites LAGEOS sont utilisés comme cible pour les impulsions laser envoyées par les stations au sol pour calculer la distance instantanée (technique « Satellite Laser Ranging » (SLR)). La détermination de l'orbite des satellites nécessite des modèles pour la dynamique des satellites, pour les procédures de mesure et pour les transformations des référentiels[405]. Les modèles prennent en compte les perturbations géopotentielles, lunisolaires et planétaires, la pression du rayonnement solaire et les effets de l'albédo de la Terre, les effects Rubin-cam et Yarkovsky-Schach, les coordonnées des stations SLR, le chargement des océans, les paramètres d'orientation de la terre et la procédure de mesure[406]. Les modèles incluent également des corrections relativistes générales dans le formalisme paramétrique post-newtonien (PPN) [407]. Les tests effectués confirment les prédictions de la relativité générale (précession de Schwarzschild, effet Lense-Thirring) et excluent une théorie alternative (le potentiel NLRI/Yukawa).

2.4.5 Tests en champ fort

Lorsque la densité du corps devient suffisamment importante, la relativité générale prédit la formation d'un trou noir. Les étoiles à neutrons d'environ 1,4 masses solaires et les trous noirs sont l'état final de l'évolution des étoiles massives[408]. Habituellement, un trou noir dans une galaxie a

---

[404] Lightman et Lee, « Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle », 8, 364-76.

[405] Friedrich W. Hehl et al., « General relativity with spin and torsion: Foundations and prospects », *Reviews of Modern Physics* 48, nº 3 (1 juillet 1976): 393– 416, https://doi.org/10.1103/RevModPhys.48.393.

[406] Emil T. Akhmedov et al., « Experimental Tests of Quantum Gravity and Exotic Quantum Field Theory Effects », ResearchGate, 2014, https://www.researchgate.net/publication/274948108_Experimental_Tests_of_Quantum_Gravity_and_Exotic_Quantum_Field_Theory_Effects.

[407] Nordtvedt et Will, « Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity », 775–792.

[408] Cole Miller, « Stellar Structure and Evolution (Lecture notes for Astronomy 606) », 2002, http://www.astro.umd.edu/~miller/teaching/astr606/.

joué un rôle important dans sa formation et les structures cosmiques associées. De tels corps fournissent un mécanisme efficace pour l'émission de rayonnement électromagnétique[409] et la formation de microquasars[410]. L'accrétion peut conduire à des jets relativistes. La relativité générale permet la modélisation de ces phénomènes[411], confirmée par des observations.

Les trous noirs sont les zones où les ondes gravitationnelles sont recherchées, parfois formées par la combintion des étoiles binaires avec des trous noirs, détectés sur Terre; la phase de pré-fusion ("chirp") peut être utilisée comme "éclairage standard" pour déduire la distance jusqu'aux événements de fusion, servant de preuve de l'expansion cosmique sur de longues distances[412]. Lorsqu'un trou noir rejoint un autre trou noir supermassif, il peut fournir des informations directes sur la géométrie du trou noir supermassif. [413]

En février 2016 et plus tard en juin 2016, juin 2017 et août 2017, Advanced LIGO a annoncé qu'il avait directement détecté les ondes gravitationnelles d'une fusion d'étoiles avec le trou noir[414]. Les ondes gravitationnelles peuvent être détectées directement, et de nombreux aspects de l'Univers peuvent être trouvés dans leur étude. L'astronomie des ondes gravitationnelles vise à tester la relativité générale et des théories alternatives, à vérifier la forme prédite des ondes et leur conformité avec les solutions des équations de champ. [415]

---

[409] R. D. Blandford, « Astrophysical black holes. », in *Three Hundred Years of Gravitation*, 1987, 277–329, http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..277B.

[410] Annalisa Celotti, John C. Miller, et Dennis W. Sciama, « Astrophysical evidence for the existence of black holes », *Classical and Quantum Gravity* 16, nº 12A (1 décembre 1999): A3–A21, https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301.

[411] José A. Font, « Numerical Hydrodynamics in General Relativity », *Living Reviews in Relativity* 6, nº 1 (19 août 2003): 2, https://doi.org/10.12942/lrr-2003-4.

[412] Neal Dalal et al., « Short GRB and binary black hole standard sirens as a probe of dark energy », *Physical Review D* 74, nº 6 (18 septembre 2006): 063006, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.063006.

[413] Leor Barack et Curt Cutler, « LISA capture sources: Approximate waveforms, signal-to-noise ratios, and parameter estimation accuracy », *Physical Review D* 69, nº 8 (30 avril 2004): 082005, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.082005.

[414] Charles Q. Choi, « Gravitational Waves Detected from Neutron-Star Crashes: The Discovery Explained », Space.com, 2017, https://www.space.com/38471-gravitational-waves-neutron-star-crashes-discovery-explained.html.

[415] B. P. Abbott et al., « Tests of General Relativity with GW150914 », *Physical Review Letters* 116, nº 22 (31 mai 2016): 221101, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.221101.

D'autres tests pour la gravité forte permettent d'observer le décalage gravitationnel vers le rouge de la lumière de l'étoile S2 en orbite autour du trou noir supermassif Sagittaire A* au centre de la Voie lactée, à l'aide du très grand télescope utilisant GRAVITY, NACO et SIFONI. [416]

Le principe d'équivalence fort de la relativité générale pour les corps à autogravité forte a été testé à l'aide d'un système à trois étoiles appelé PSR J0337+1715, composé d'une étoile à neutrons avec une étoile naine blanche située à environ 4200 années-lumière de la Terre qui orbite avec une autre étoile naine blanche éloignée. Les observations, avec une grande précision, comparent la manière dont l'attraction gravitationnelle de la naine blanche extérieure affecte le pulsar qui a une forte autogravité et la naine blanche intérieure. Les résultats ont confirmé la théorie générale de la relativité. [417]

2.4.5.1 Lentilles gravitationnelles

Lorsqu'un corps astronomique massif se trouve entre l'observateur et un corps distant avec une masse et une distance appropriées, plusieurs images déformées du corps distant peuvent être vues, formant l'effet connu sous le nom de lentilles gravitationnelles[418], deux images ou plus ont la forme d'un anneau lumineux connu sous le nom d'anneau d'Einstein ou d'anneaux partiels (arches) [419]. La première observation de ce type remonte à 1979[420]. L'effet peut être mesuré en fonction de la luminosité du corps éloigné. Les lentilles gravitationnelles permettent de détecter la présence et la distribution de matière noire, étant une sorte de "télescope naturel" pour observer des galaxies éloignées et obtenir une estimation indépendante de la constante de Hubble. Leurs évaluations statistiques fournissent des informations sur l'évolution structurelle des galaxies[421]. La lentille

---

[416] R. Abuter et al., « Detection of the Gravitational Redshift in the Orbit of the Star S2 near the Galactic Centre Massive Black Hole », *Astronomy & Astrophysics* 615 (1 juillet 2018): L15, https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833718.

[417] Anne M. Archibald et al., « Universality of Free Fall from the Orbital Motion of a Pulsar in a Stellar Triple System », *Nature* 559, nº 7712 (juillet 2018): 73–76, https://doi.org/10.1038/s41586-018-0265-1.

[418] Joachim Wambsganss, « Gravitational Lensing in Astronomy », *Living Reviews in Relativity* 1, nº 1 (2 novembre 1998): 12, https://doi.org/10.12942/lrr-1998-12.

[419] Bernard Schutz, « Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz », Cambridge Core, décembre 2003, https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800.

[420] D. Walsh, R. F. Carswell, et R. J. Weymann, « 0957 + 561 A, B: Twin Quasistellar Objects or Gravitational Lens? », *Nature* 279, nº 5712 (mai 1979): 381–384, https://doi.org/10.1038/279381a0.

[421] Ramesh Narayan et Matthias Bartelmann, « Lectures on Gravitational Lensing », *arXiv:astro-ph/9606001*, 3 juin 1996, sect. 3.7, http://arxiv.org/abs/astro-ph/9606001.

gravitationnelle devrait compléter les observations dans le spectre électromagnétique[422], fournir des informations sur les trous noirs, les étoiles à neutrons et les naines blanches, et sur les processus dans les supernovae et l'univers immédiatement après le Big Bang, y compris la théorie des cordes de la gravité quantique. [423]

Des lentilles gravitationnelles se forment également au niveau du système solaire, le Soleil étant interposé entre l'observateur et la source distante de lumière, mais le point de convergence de ces lentilles serait à environ 542 UA du Soleil. Cette distance, cependant, dépasse les capacités de l'équipement de sonde et va bien au-delà du système solaire.

Les sources de lentilles gravitationnelles sont des sources radio très éloignées, en particulier certains quasars. Pour la détection, les radiotélescopes séparés par de grandes distances combinés en utilisant la technique d'interférométrie de base très longue sont utilisés. Pour plus de précision, lsont considérés les effets systématiques au niveau de la Terre, où les télescopes sont situés. Les observations ont confirmé la valeur de la déformation prédite par la relativité générale. [424]

À l'aide du satellite astronomique Hipparcos de l'Agence spatiale européenne, il a été constaté que le ciel entier était légèrement déformé en raison de la déviation gravitationnelle de la lumière provoquée par le Soleil (sauf la direction opposée au Soleil). Cela nécessite quelques corrections mineures pour pratiquement toutes les étoiles.

2.4.5.2 Ondes gravitationnelles

Des ondes gravitationnelles ont été prédites en 1916 par Albert Einstein[425]. Ce sont des perturbations dans la géométrie spatio-temporelle courbe, générées par les masses accélérées et se propageant à la vitesse de la lumière. Ils ont été confirmés le 11 février 2016 par l'équipe Advanced

---

[422] Kip S. Thorne, « Gravitational Waves », *arXiv:gr-qc/9506086*, 30 juin 1995, 160, http://arxiv.org/abs/gr-qc/9506086.

[423] Curt Cutler et Kip S. Thorne, « An Overview of Gravitational-Wave Sources », *arXiv:gr-qc/0204090*, 30 avril 2002, 4090, http://arxiv.org/abs/gr-qc/0204090.

[424] E. Fomalont et al., « Progress in Measurements of the Gravitational Bending of Radio Waves Using the VLBA », *The Astrophysical Journal* 699, nº 2 (10 juillet 2009): 1395–1402, https://doi.org/10.1088/0004-637X/699/2/1395.

[425] Albert Einstein, « Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation », *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), Seite 688-696.*, 1916, 1: 688–696, http://adsabs.harvard.edu/abs/1916SPAW.......688E.

LIGO[426]. Pour les champs faibles, une approximation linéaire peut être faite pour ces ondes. Les méthodes d'analyse des données sont basées sur la décomposition Fourier de ces ondes[427]. Des solutions exactes peuvent être obtenues sans approximation, mais pour les ondes gravitationnelles produites par la fusion de deux trous noirs les méthodes numériques sont le seul moyen de construire des modèles appropriés. [428]

Les ondes gravitationnelles ont été initialement suggérées par Henri Poincaré en 1905, puis prédites en 1916 par Albert Einstein sur la base de la théorie générale de la relativité. Les lois de la mécanique classique ne garantissent pas leur existence, ce qui est l'une des limitations classiques. Les systèmes d'étoiles à neutrons binaires sont une puissante source d'ondes gravitationnelles lors de la fusion. Des ondes gravitationnelles ont été détectées par les observatoires LIGO et VIRGO. Ils permettent l'observation de la fusion des trous noirs et l'étude de l'univers lointain, opaque au rayonnement électromagnétique.

Einstein et Rosen ont publié la première version correcte des ondes gravitationnelles en 1937[429]. Les ondes gravitationnelles sont créées en accélérant la masse dans l'espace, mais si l'accélération est sphérique symétrique, aucune onde gravitationnelle n'est rayonnée. Les systèmes binaires rayonnent toujours des ondes gravitationnelles, car leur accélération est asymétrique.

La première détection indirecte des ondes gravitationnelles a eu lieu en 1974 par Hulse et Taylor, à partir d'un pulsar binaire PSR 1913+16, en utilisant la détection d'onde radio retardée[430]. Ils ont constaté que l'expansion du temps gravitationnel était conforme à la prédiction de la RG et contredisait la plupart des théories alternatives[431]. La première détection directe des ondes gravitationnelles a eu lieu en 2015, avec deux détecteurs Advanced LIGO, de la source GW150914,

---

[426] B. P. Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, et the Virgo Collaboration, « Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger », *Physical Review Letters* 116, nº 6 (11 février 2016): 116(6): 061102, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102.

[427] Piotr Jaranowski et Andrzej Królak, « Gravitational-Wave Data Analysis. Formalism and Sample Applications: The Gaussian Case », *Living Reviews in Relativity* 8, nº 1 (21 mars 2005): 8 (1): 3, https://doi.org/10.12942/lrr-2005-3.

[428] Edward Seidel, « Numerical Relativity: Towards Simulations of 3D Black Hole Coalescence », *arXiv:gr-qc/9806088*, 23 juin 1998, 6088, http://arxiv.org/abs/gr-qc/9806088.

[429] A. Einstein et N. Rosen, « On Gravitational Waves », *Journal of The Franklin Institute* 223 (1 janvier 1937): 43–54, https://doi.org/10.1016/S0016-0032(37)90583-0.

[430] Hulse et Taylor, « Discovery of a pulsar in a binary system », L51–L53.

[431] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment », 17.

un trou noir binaire[432]. Ces observations ont confirmé la courbure spatio-temporelle décrite par la RG.

Joseph Weber a conçu et construit les premiers détecteurs d'ondes gravitationnelles, signalant en 1969 qu'il avait détecté les premières ondes gravitationnelles, puis signalant régulièrement les signaux du Centre Galactique. Mais la fréquence de détection a soulevé des doutes quant à la validité de ses observations. [433]

Certains scientifiques ne sont pas d'accord avec le fait que les résultats expérimentaux sont acceptés sur la base d'arguments épistémologiques. Sur la base d'expériences de détection d'ondes gravitationnelles, Harry Collins a développé un argument qu'il appelle la régression des "expérimentateurs"[434]: un résultat correct est obtenu avec un bon appareil expérimental, respectivement celui qui donne des résultats corrects. Collins fait valoir qu'il n'y a pas de critères formels pour vérifier l'appareil, pas même en étalonnant un appareil en utilisant un signal "de substitution"[435]. Le problème est finalement résolu par la négociation au sein de la communauté scientifique, en fonction de facteurs tels que la carrière, les intérêts sociaux et cognitifs des scientifiques et l'utilité perçue pour les travaux futurs, mais sans utiliser de critères épistémologiques ou de jugement rationnel. Ainsi, Collins affirme qu'il existe de sérieux doutes sur les preuves expérimentales et leur utilisation dans l'évaluation des hypothèses et des théories scientifiques. L'exemple donné par Collins concerne les premières expériences pour détecter le rayonnement gravitationnel ou les ondes gravitationnelles. [436]

La communauté physique a été obligée de comparer les hypothèses de Weber avec les rapports de six autres expériences qui n'ont pas détecté d'ondes gravitationnelles. Collins soutient que la décision entre ces résultats expérimentaux contradictoires ne pouvait pas être prise pour des raisons épistémologiques ou méthodologiques - les six expériences négatives ne pouvaient pas légitimement être considérées comme des réplications, et étaient donc considérées comme moins importantes. Dans ses expériences, Weber a utilisé un nouveau type d'appareil pour détecter un

[432] Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, et the Virgo Collaboration, « Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger », 116(061102).

[433] Jorge L. Cervantes-Cota, Salvador Galindo-Uribarri, et George F. Smoot, « A Brief History of Gravitational Waves », *Universe* 2, nº 3 (septembre 2016): 2 (3): 22, https://doi.org/10.3390/universe2030022.

[434] Collins, *Changing Order*, 4:79-111.

[435] Franklin et Perovic, « Experiment in Physics ».

[436] Allan Franklin, « Calibration », in *Can That Be Right? Essays on Experiment, Evidence, and Science*, éd. par Allan Franklin, Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 1999), 5: 31–80, https://doi.org/10.1007/978-94-011-5334-8_9.

phénomène jusque-là non observé, qui ne pouvait pas être soumis à des techniques d'étalonnage standard. [437]

Les résultats d'autres scientifiques qui contredisaient celui de Weber étaient plus nombreux et ont été soigneusement vérifiés et confirmés par d'autres groupes de chercheurs. Ils ont cherché à savoir si leur procédure d'analyse, un algorithme linéaire, pouvait expliquer l'échec de l'observation des résultats de Weber. Ils ont changé la procédure pour celle utilisée par Weber, un algorithme non linéaire, pour analyser leurs propres données, mais n'ont à nouveau trouvé aucune trace d'ondes gravitationnelles. Ils ont recalibré leurs dispositifs expérimentaux en introduisant des impulsions d'énergie acoustique connues et en détectant ainsi un signal. [438]

Il y avait aussi d'autres doutes sur les procédures d'analyse de Weber. Une erreur de programmation admise a généré de fausses coïncidences entre les deux détecteurs qui pourraient être interprétées comme réelles pendant les expériences.

Les résultats des critiques étaient beaucoup plus crédibles du point de vue des procédures à suivre: ils ont vérifié les résultats par une confirmation indépendante qui comprenait le partage des données et des programmes d'analyse, ont éliminé une source d'erreur plausible, et ils ont calibré les dispositifs en injectant des impulsions d'énergie connues et en observant la sortie. Allan Franklin et Slobodan Perovic croient que la communauté scientifique a porté un jugement motivé en rejetant initialement les résultats de Weber en acceptant ceux de ses détracteurs. Bien qu'aucune règle formelle stricte n'ait été appliquée, la procédure était raisonnable. [439]

Une autre façon de détecter les ondes gravitationnelles est par l'interaction des ondes avec les parois d'une cavité à micro-ondes, avec un formalisme développé par Caves, pour mesurer l'effet Lense-Thirring[440] et détecter les ondes gravitationnelles à haute fréquence. [441]

2.4.5.3 Pulsars de synchronisation

Les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation qui émettent des ondes radio par impulsions pendant leur rotation, fonctionnant ainsi comme des montres qui permettent une mesure très précise

---

[437] Franklin et Perovic, « Experiment in Physics ».

[438] Franklin et Perovic.

[439] Franklin et Perovic.

[440] C. M. Will, « The theoretical tools of experimental gravitation », 1974, 1, http://adsabs.harvard.edu/abs/1974exgr.conf....1W.

[441] Caves, « Theoretical investigations of experimental gravitation ».

de leurs mouvements orbitaux. Leurs observations ont montré que leurs précessions, qui ne peuvent être expliquées par la mécanique classique, peuvent être expliquées par la relativité générale. [442]

Par des mesures sur les pulsars binaires peuvent être tester les effets relativistes combinés, y compris le retard Shapiro[443]. Et, comme le champ gravitationnel près des pulsars est fort, le principe d'équivalence faible peut également être testé en raison de l'invariance de position locale d'objets ayant de fortes propriétés d'auto-gravité. [444]

2.4.5.4 Environnements extrêmes

Les environnements extrêmes de gravité sont proches des corps compacts très massifs, où la courbure de l'espace-temps est très prononcée et les effets relativistes généraux sont profonds. Ce sont généralement des étoiles à neutrons et des trous noirs (surtout supermassifs), le noyau galactique actif et les quasars. Les écarts par rapport à la RG sont les plus susceptibles de se produire ici, sous un régime de gravité forte. Un tel test, pendant 16 ans, a été réalisé par Gillessen et al. [445], pour Sagitarius A* [Sgr A *], une source lumineuse au centre de la Voie lactée où se trouve un trou noir supermassif. Les observations faites par Hambaryan et al. [446] a été en plein accord avec la RG, une confirmation essentielle de cette théorie.

2.4.6 Tests cosmologiques

Les modèles cosmologiques actuels sont construits sur la base de la relativité générale. Les solutions des équations spécifiques, Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, [447] permettent de

---

[442] Joel M. Weisberg, David J. Nice, et Joseph H. Taylor, « Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16 », *The Astrophysical Journal* 722, nº 2 (20 octobre 2010): 722 (2): 1030–1034, https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1030.

[443] Lijing Shao et Norbert Wex, « Tests of gravitational symmetries with radio pulsars », *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 59, nº 9 (septembre 2016): 59(699501), https://doi.org/10.1007/s11433-016-0087-6.

[444] Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

[445] S. Gillessen et al., « Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center », *The Astrophysical Journal* 692, nº 2 (20 février 2009): 692(2), p.1075–1109, https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075.

[446] V. Hambaryan et al., « On the compactness of the isolated neutron star RX J0720.4-3125 », *Astronomy & Astrophysics* 601 (mai 2017): A108, https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630368.

[447] Sean M. Carroll, « The Cosmological Constant », *Living Reviews in Relativity* 4, nº 1 (7 février 2001): 4 (1): 1, https://doi.org/10.12942/lrr-2001-1.

modéliser l'évolution de l'univers à partir du Big Bang[448]. Certains paramètres de l'univers ont été établis par des observations. Sur la base de ces données et d'autres données d'observation, les modèles peuvent être testés[449]. Les prédictions incluent l'abondance initiale d'éléments chimiques formés dans une période de nucléosynthèse pendant la période du Big Bang, la structure subséquente de l'univers[450], le rayonnement de fond cosmique[451], etc.

Les observations sur la vitesse d'expansion de l'univers permettent d'estimer la quantité totale de matière, dont certaines théories prédisent que 90% sont de la matière noire, avec de masse mais sans interactions électromagnétiques, et ne peuvent pas être directement observées. Le décalage gravitationnel vers le rouge des supernovae et les mesures du rayonnement cosmique de fond montrent une dépendance de l'évolution de l'univers à une constante cosmologique avec une accélération de l'expansion cosmique ou, alternativement, une forme d'énergie appelée « noire ». [452]

À partir des mesures du rayonnement de fond cosmique[453], en 1980, l'existence initiale d'une phase d'inflation a été déduite, suivie d'une phase d'expansion fortement accélérée après environ 10^{-33} secondes, expliquant ainsi l'homogénéité presque parfaite du rayonnement de fond cosmique.

Les phénomènes dans le domaine des trous noirs remettent en question nos concepts fondamentaux d'espace, de temps, de déterminisme, d'irréversibilité, d'information et de causalité. Normalement, nous pouvons considérer l'état actuel de l'Univers comme l'effet de son passé et la cause de son avenir. Chaque état de l'Univers est déterminé par un ensemble de conditions initiales et les lois de la physique. Les théorèmes ne s'appliquent qu'aux objets mathématiques, pas à la réalité. L'existence de solutions à certaines équations de lois physiques n'implique pas l'existence physique,

---

[448] La scări mari de aproximativ o sută de milioane de ani-lumină și mai mult, universul pare într-adevăr izotrop și omogen, deci modelele simplificate sunt justificate.

[449] Sarah L. Bridle et al., « Precision Cosmology? Not Just Yet . . . », *Science* 299, nº 5612 (7 mars 2003): 299 (5612): 1532–1533, https://doi.org/10.1126/science.1082158.

[450] Volker Springel et al., « Simulations of the Formation, Evolution and Clustering of Galaxies and Quasars », *Nature* 435, nº 7042 (juin 2005): 435 (7042): 629–636, https://doi.org/10.1038/nature03597.

[451] Uroš Seljak et Matias Zaldarriaga, « Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background », *Physical Review Letters* 78, nº 11 (17 mars 1997): 78 (11): 2054–2057, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2054.

[452] Thomas Buchert, « Dark Energy from Structure: A Status Report », *General Relativity and Gravitation* 40, nº 2 (1 février 2008): 40 (2–3): 467–527, https://doi.org/10.1007/s10714-007-0554-8.

[453] D. N. Spergel et al., « Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology », *The Astrophysical Journal Supplement Series* 170, nº 2 (juin 2007): 170 (2): 377–408, https://doi.org/10.1086/513700.

celle-ci étant indépendante de nos conceptions. Les solutions d'équations dynamiques ne peuvent pas prédire tous les événements futurs. La relativité générale implique l'existence de tous les événements représentés par une variété topologique, c'est donc une théorie déterministe ontologique. Mais l'impossibilité de déterminer les horizons des trous noirs démontre que la relativité générale est un exemple de théorie qui peut être déterministe ontologiquement, mais néanmoins indéterminée épistémologiquement. [454]

2.4.6.1 L'univers en expansion

La théorie du Big Bang est le principal modèle cosmologique[455] de la première histoire de l'univers et de son évolution ultérieure. Il fournit une explication pour un large éventail de phénomènes, y compris l'abondance des éléments légers, le fond diffus cosmologique, la structure de l'univers et la loi de Hubble[456]. Les physiciens n'étaient pas d'accord pour dire que l'univers est parti d'une singularité ou que nos connaissances actuelles sont insuffisantes pour en déduire l'état initial. Les mesures du taux d'expansion de l'univers montrent que l'univers est né il y a 13,8 milliards d'années. Après l'expansion initiale, l'univers s'est refroidi en particules subatomiques puis en atomes. La coagulation de ces éléments primordiaux par gravité a conduit à la formation des étoiles et des galaxies actuelles.

À partir de plusieurs théories alternatives, la communauté scientifique a préféré la théorie du Big Bang en raison de sa puissance heuristique beaucoup plus grande, couplée à un large éventail de preuves empiriques, telles que le décalage vers le rouge analysé par Edwin Hubble en 1929 et la découverte du rayonnement de fond cosmique en 1964[457]. L'évolution de l'univers se déduit à partir de la situation actuelle, vers un état initial de densité et de température énormes.

Les accélérateurs de particules peuvent reproduire les conditions après les premiers instants de l'univers, confirmant et affinant les détails du modèle Big Bang. La théorie du Big Bang explique de nombreux phénomènes observés. Le modèle du Big Bang est basé sur la théorie de la relativité générale et des hypothèses simplificatrices, telles que l'homogénéité et l'isotropie de l'espace. Les équations du modèle ont été formulées par Alexander Friedmann et des solutions similaires ont été

---

[454] Gustavo E. Romero, « Philosophical Issues of Black Holes », *arXiv:1409.3318 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:physics]*, 10 septembre 2014, http://arxiv.org/abs/1409.3318.

[455] Dennis Overbye, « Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast? », *The New York Times*, 20 février 2017, sect. Science, https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html.

[456] E. L Wright, « What is the evidence for the Big Bang?, in Frequently Asked Questions in Cosmology », 2009, http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#BBevidence.

[457] R. B. Partridge, *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation* (Cambridge University Press, 2007), xvii.

trouvées par Willem de Sitter. La paramétrisation du modèle Big Bang en tant que modèle standard, appelé modèle Lambda-CDM, permet des recherches actuelles sur la cosmologie théorique.

Les déductions théoriques des phénomènes observés nous conduisent à une singularité initiale (au temps $t = 0$), à densité et température infinies[458]. La relativité générale n'est pas en mesure de décrire ce régime, ni aucune autre loi physique, et ces lois ne peuvent pas être extrapolées au-delà de la fin de la période de Planck (10^{-37} secondes à partir du début de l'expansion). Les mesures d'expansion en observant les supernovae et en mesurant les fluctuations de température dans l'environnement cosmique à micro-ondes montrent que « l'âge de l'univers » est de 13,799 ± 0,021 milliard d'années[459], ce résultat favorisant le modèle cosmologique LCDM.

Les mesures de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) montrent la conformité avec le modèle Lambda-CDM où la matière noire est supposée froide[460] et représente environ 23% de la matière / énergie de l'univers, tandis que la matière baryonique représente environ 4,6%. Un « modèle étendu » comprend la matière neutrino chaude et sombre.

Les preuves de l'observation de la supernova et du rayonnement de fond cosmique montrent un univers dominé par une forme d'énergie connue sous le nom d'énergie noire, qui imprègne tout l'espace, représentant 73% de la densité d'énergie totale dans l'univers d'aujourd'hui. Sa composition et son mécanisme sont inconnus. [461]

Le cœur du programme de recherche du Big Bang comprend deux hypothèses majeures : l'universalité des lois physiques et le principe cosmologique (selon lequel l'univers est largement homogène et isotrope). Actuellement il y a des tentatives pour les tester en dehors du programme de recherche Big Bang. La première hypothèse a été testée en tenant compte de la plus grande déviation possible de la structure fine constante pour l'âge de l'univers[462]. Le principe

---

[458] Tai L. Chow, *Gravity, Black Holes, and the Very Early Universe: An Introduction to General Relativity and Cosmology* (Springer Science & Business Media, 2007), 211.

[459] P. a. R. Ade et al., « Planck 2015 Results - XIII. Cosmological Parameters », *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octobre 2016): 594: A13, https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525830.

[460] D. N. Spergel et al., « First-YearWilkinson Microwave Anisotropy Probe(WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters », *The Astrophysical Journal Supplement Series* 148, nº 1 (septembre 2003): 148 (1): 175–194, https://doi.org/10.1086/377226.

[461] P. J. E. Peebles et Bharat Ratra, « The cosmological constant and dark energy », *Reviews of Modern Physics* 75, nº 2 (22 avril 2003): 75 (2): 559–606, https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.559.

[462] A. V. Ivanchik, A. Y. Potekhin, et D. A. Varshalovich, « The fine-structure constant: a new observational limit on its cosmological variation and some theoretical consequences », *arXiv:astro-ph/9810166*, 10 octobre 1998, 343: 459, http://arxiv.org/abs/astro-ph/9810166.

cosmologique a été confirmé à un niveau de 10^{-5} par les observations du rayonnement cosmique de fond. [463]

La preuve observationnelle la plus ancienne et la plus directe du Big Bang est l'expansion de l'univers selon la loi de Hubble (déduite du décalage vers le rouge des galaxies), la découverte et la mesure du rayonnement de fond cosmique et les quantités relatives d'éléments légers produits par la nucléosynthèse du Big Bang. Des observations récentes sur la formation des galaxies et l'évolution et la distribution des structures cosmiques à grande échelle confirment également cette théorie. [464]

Les modèles actuels du Big Bang introduisent diverses hypothèses *ad hoc* pour des phénomènes physiques exotiques qui n'ont pas été observés lors d'expériences ou incorporés dans le modèle standard du physique des particules. Parmi ceux-ci, l'hypothèse de la matière noire est actuellement à l'étude au niveau du laboratoire[465]. Pour l'énergie noire, aucune méthode de détection directe ou indirecte n'a encore été trouvée. [466]

La loi de Hubble et *l'expansion de l'espace* sont vérifiées par des observations de décalages vers le rouge des galaxies et des quasars. L'expansion de l'univers a été prédite par la relativité générale d'Alexander Friedmann en 1922[467] et de Georges Lemaître en 1927[468], confirmant la théorie du Big Bang développée par Friedmann, Lemaître, Robertson et Walker.

Le rayonnement du fond cosmique micro-ondes a été découvert en 1964 par Arno Penzias et Robert Wilson, comme un signal omnidirectionnel dans la bande micro-ondes. Cela a confirmé les prévisions du Big Bang pour Alpher, Herman et Gamow en 1950.

En 1989, la NASA a lancé le satellite Cosmic Background Explorer (COBE) qui, en 1990, par des mesures de spectre de haute précision, a montré que le spectre de fréquence du fond diffus

---

[463] Jeremy Goodman, « Geocentrism reexamined », *Physical Review D* 52, nº 4 (15 août 1995): 52 (4): 1821–1827, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.1821.

[464] Michael D. Gladders et al., « Cosmological Constraints from the Red-Sequence Cluster Survey », *The Astrophysical Journal* 655, nº 1 (janvier 2007): 655 (1): 128–134, https://doi.org/10.1086/509909.

[465] Bernard Sadoulet, « The Direct Detection of Dark Matter », ResearchGate, 1998, https://www.researchgate.net/publication/260854303_The_Direct_Detection_of_Dark_Matter.

[466] Partridge, *3K*, xvii.

[467] A. Friedman, « On the Curvature of Space », *General Relativity and Gravitation* 31, nº 12 (1 décembre 1999): 10 (1): 377–386, https://doi.org/10.1023/A:1026751225741.

[468] Abbé G. Lemaître, « A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulæ », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91, nº 5 (13 mars 1931): 47A: 41, https://doi.org/10.1093/mnras/91.5.483.

cosmologique est un corps noir presque parfait ; puis en 1992, d'autres ont trouvé de minuscules fluctuations (anisotropies) à la température du fond diffus cosmologique le long du ciel. Au cours des années 2000-2001, plusieurs expériences, telles que BOOMERanG, ont conclu que la forme de l'univers est presque un plan spatial, en mesurant la dimension angulaire typique des anisotropies[469]. En 2003, les résultats de la sonde Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) ont rejeté certains modèles spécifiques d'inflation cosmique, mais étaient conformes à la théorie de l'inflation en général. [470]

Les abondances relatives des éléments dépendent du rapport photons / baryons. Les mesures sont en accord avec celles prédites à partir d'une seule valeur du rapport baryon-photon, confirmant pleinement le deutérium, environ 4He, et une plus grande différence pour 7Li. Mais l'identité générale avec les abondances prédites par la nucléosynthèse du Big Bang confirme ce modèle. [471]

L'évolution et la distribution des galaxies et des quasars sont en accord avec le Big Bang. Les observations et la théorie suggèrent que les premiers quasars et galaxies se sont formés environ un milliard d'années après le Big Bang, après quoi les clusters de galaxies et les superclusters se sont formés. Les différences entre les galaxies relativement récemment formées et celles formées peu après le Big Bang confirment ce modèle et réfutent le modèle stationnaire. [472]

Les nuages de gaz primordiaux ont été confirmés en 2011, en analysant les raies d'absorption dans les spectres de quasars éloignés. Ils ne contiennent pas d'éléments plus lourds, juste de l'hydrogène et du deutérium. [473]

L'âge de l'univers, estimé à partir de l'expansion de Hubble et le fond diffus cosmologique, est en accord avec les mesures de l'évolution stellaire dans les groupes globulaires et la datation radiométrique des étoiles individuelles.

---

[469] A. Melchiorri et al., « A measurement of Omega from the North American test flight of BOOMERANG », *The Astrophysical Journal* 536, nº 2 (20 juin 2000): 536(2): L63–L66, https://doi.org/10.1086/312744.

[470] Spergel et al., « Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results », 170 (2): 377–408.

[471] Barbara Ryden, *Introduction to cosmology*, 2003, http://adsabs.harvard.edu/abs/2003itc..book.....R.

[472] Edmund Bertschinger, « Cosmological Perturbation Theory and Structure Formation », *arXiv:astro-ph/0101009*, 31 décembre 2000, http://arxiv.org/abs/astro-ph/0101009.

[473] Michele Fumagalli, John M. O'Meara, et J. Xavier Prochaska, « Detection of Pristine Gas Two Billion Years After the Big Bang », *Science* 334, nº 6060 (2 décembre 2011): 334 (6060): 1245–9, https://doi.org/10.1126/science.1213581.

La prédiction selon laquelle *la température du fond diffus cosmologique* était plus élevée dans le passé a été prouvée expérimentalement par les observations des raies d'absorption à très basse température dans les nuages de gaz lors du décalage vers le rouge. [474]

2.4.6.2 Observations cosmologiques

Stephen Hawking a introduit le concept de rayonnement Hawkin selon lequel les trous noirs ont une entropie. Ce concept stipule que les trous noirs peuvent rayonner de l'énergie, conserver l'entropie et résoudre les problèmes d'incompatibilité avec la deuxième loi de la thermodynamique. La perte d'énergie suggère que les trous noirs « s'évaporent » avec le temps.

Un trou noir agit comme un corps noir idéal car il ne réfléchit pas la lumière. La théorie du champ quantique dans l'espace courbe prédit que les horizons de l'événement émettent un rayonnement Hawking avec le même spectre qu'un corps noir[475], avec une température inversement proportionnelle à sa masse, de l'ordre de milliards de kelvins, les rendant essentiellement inobservables.

La présence d'un trou noir peut être déduite indirectement par son interaction avec d'autres matériaux et le rayonnement électromagnétique. La matière qui tombe sur un trou noir peut former un disque d'accrétion externe, l'un des objets les plus brillants de l'univers. S'il y a d'autres étoiles en orbite autour d'un trou noir, leurs orbites peuvent être utilisées pour déterminer la masse et l'emplacement du trou noir, après avoir exclu des alternatives telles que les étoiles à neutrons. De cette façon, il a été établi que la source radio Sagittaire A*, au centre de la galaxie Voie lactée, contient un trou noir supermassif d'environ 4,3 millions de masses solaires. Le 11 février 2016, LIGO a annoncé la première observation d'ondes gravitationnelles qui auraient été générées à partir d'une fusion de trous noirs[476], et en décembre 2018, une autre détection d'un événement des ondes gravitationnelles résultant de l'union d'un trou noir avec une étoile à neutrons a été annoncée[477]. Le

[474] A. Avgoustidis et al., « Constraints on the CMB Temperature-Redshift Dependence from SZ and Distance Measurements », *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, nº 02 (février 2012): 2012 (2): 013, https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/02/013.

[475] P. C. W. Davies, « Thermodynamics of Black Holes », *Reports on Progress in Physics* 41, nº 8 (août 1978): 41 (8): 1313–1355, https://doi.org/10.1088/0034-4885/41/8/004.

[476] Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, et the Virgo Collaboration, « Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger », 116 (6): 061102.

[477] LIGO Scientific Collaboration, « Detection of gravitational waves », 2019, https://www.ligo.org/detections.php.

10 avril 2019, la première image d'un trou noir a été capturée à l'aide des observations du télescope Event Horizon 2017 du trou noir supermassif dans le centre galactique de Messier 87. [478]

Le théorème « de calvitie » déclare qu'un trou noir stable n'a que trois propriétés physiques indépendantes : la masse, la charge et le moment angulaire[479]. Deux trous noirs qui ont les mêmes valeurs pour ces propriétés ne peuvent pas être distingués selon la mécanique classique (non quantique). Ces propriétés sont visibles de l'extérieur d'un trou noir et peuvent être mesurées.

L'horizon des événements est similaire à un système dissipatif qui est presque analogue à celui d'une membrane conductrice élastique avec résistance électrique et frottement - le paradigme de la membrane[480]. Il n'y a aucun moyen d'éviter de perdre des informations sur les conditions initiales, y compris les paramètres quantiques[481]. Ce comportement a été appelé le *paradoxe de la perte d'informations* sur les trous noirs. [482]

L'existence des trous noirs est déduite par des observations indirectes, basées sur des interactions gravitationnelles avec leur voisinage. [483]

L'observation des *orbites des étoiles autour du Sagittaire A** au centre de la Voie lactée a fourni des preuves solides de l'existence d'un trou noir supermassif[484]. De plus, il existe des preuves

[478] K. L. Bouman et al., « Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction », in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, 913–922, https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.105.

[479] Markus Heusler, Piotr T. Chruściel, et João Lopes Costa, « Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond », *Living Reviews in Relativity* 15, nº 1 (décembre 2012): 15 (7): 7, https://doi.org/10.12942/lrr-2012-7.

[480] Kip S. Thorne, Richard H. Price, et Douglas A. MacDonald, *Black holes: The membrane paradigm*, 1986, http://adsabs.harvard.edu/abs/1986bhmp.book.....T.

[481] Les composants d'un champ quantique à l'intérieur et à l'extérieur du trou noir seront généralement séparés, mais la micro-causalité implique que les degrés de liberté du trou noir ne peuvent pas être recombinés de manière cohérente avec ceux de l'univers extérieur. Ainsi, lorsque le trou noir se sera complètement évaporé, ces séparations disparaîtront et l'entropie de l'univers augmentera.

[482] Warren G. Anderson, « Black Hole Information Loss », 1996, http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/info_loss.html.

[483] NASA, « Black Holes | Science Mission Directorate », 2019, https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes.

[484] Gillessen et al., « Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center », 692 (2): 1075–1109.

d'observation que ce corps cosmique pourrait avoir un horizon d'événements, une caractéristique claire des trous noirs. [485]

En préservant le moment angulaire, le gaz dans le puits gravitationnel d'un trou noir forme une structure en forme de disque autour de l'objet (*disque d'accrétion*) [486], émettant un rayonnement électromagnétique (principalement des rayons X) qui peut être détecté par les télescopes. Dans certains cas, les disques d'accrétion peuvent être accompagnés de jets relativistes émis le long des pôles, qui éliminent une grande partie de l'énergie. Beaucoup de phénomènes énergétiques de l'univers sont l'accumulation de matière des trous noirs, en particulier les noyaux galactiques actifs et les quasars, considérés comme les disques d'accumulation des trous noirs supermassifs. En novembre 2011, la première observation directe d'un disque d'accrétion d'un quasar autour d'un trou noir supermassif a été rapportée. [487]

Les *systèmes à rayons X binaires* émettent une grande partie de leur rayonnement lorsque l'une des étoiles prend la masse d'une autre étoile, permettant ainsi d'étudier un trou noir[488]. Dans ce but, le Cygnus X-1, découvert par Charles Thomas Bolton, Louise Webster et Paul Murdin en 1972, a été étudié, les résultats n'étant pas certains car l'étoile qui l'accompagne est beaucoup plus lourde que le trou noir candidat. Par la suite, d'autres meilleurs candidats ont été trouvés. L'absence du disque d'accrétion d'un tel système est due à un flux massique d'accumulation dominé par l'advection qui, s'il est confirmé par observation, est une preuve solide de la présence d'un horizon d'événement[489]. Les émissions de rayons X des disques d'accrétion se comportent parfois comme des oscillations quasi-périodiques, la fréquence dépendant de la masse de l'objet compact. Ce phénomène peut être utilisé pour déterminer la masse des trous noirs.

Les astronomes ont observé certaines galaxies, dites « actives », aux caractéristiques inhabituelles, telles que l'émission inhabituelle de raies spectrales et de très fortes émissions radio. Ils peuvent s'expliquer par la présence de trous noirs supermassifs[490]. La corrélation observationnelle entre la

---

[485] Avery E. Broderick, Abraham Loeb, et Ramesh Narayan, « The Event Horizon of Sagittarius A* », *The Astrophysical Journal* 701, nº 2 (20 août 2009): 701(2): 1357–1366, https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/1357.

[486] J. A. Marck, « Shortcut method of solution of geodesic equations for schwarzschild black hole », *Classical and Quantum Gravity* 13, nº 3 (1 mars 1996): 13 (3): 393–402, https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/3/007.

[487] José A. Muñoz et al., « A Study of Gravitational Lens Chromaticity with the Hubble Space Telescope », *The Astrophysical Journal* 742, nº 2 (1 décembre 2011): 742 (2): 67, https://doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/67.

[488] Celotti, Miller, et Sciama, « Astrophysical evidence for the existence of black holes », 16 (12A): A3–A21.

[489] Ramesh Narayan et Jeffrey E. McClintock, « Advection-dominated accretion and the black hole event horizon », *New Astronomy Reviews*, Jean-Pierre Lasota, X-ray Binaries, Accretion Disks and Compact Stars, 51, nº 10 (1 mai 2008): 51 (10–12): 733–751, https://doi.org/10.1016/j.newar.2008.03.002.

[490] Julian Henry Krolik, *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment* (Princeton University Press, 1999).

masse de ce trou et la vitesse de dispersion de la galaxie hôte, connue sous le nom de relation M-sigma, suggère un lien entre la formation du trou noir et la galaxie elle-même.[491]

Les scientifiques espèrent qu'à l'avenir ils pourront tester des trous noirs en observant les effets causés par un fort champ gravitationnel à proximité, comme la lentille gravitationnelle. Il existe déjà des observations sur les lentilles gravitationnelles faibles, dans lesquelles les rayons lumineux sont déviés en quelques secondes seulement, mais jamais directement pour un trou noir. Il existe plusieurs candidats à cet effet, en orbite autour du Sagittaire A*.[492]

Plusieurs conjectures *ad hoc* ont été introduites pour mieux expliquer les observations de candidats de trous noirs astronomiques identiques, mais avec des mécanismes de fonctionnement différents : gravastar, étoile noire (gravité semi-classique)[493], étoile à énergie noire, etc.[494]

La cosmologie, en tant qu'étude de l'univers physique, a commencé comme une branche de la physique théorique à travers le modèle statique de l'univers d'Einstein de 1917, développé plus tard par Lemaître[495]. Depuis 1960, la cosmologie est considérée comme une branche de la philosophie. Le modèle standard de la cosmologie est basé sur des extrapolations de théories existantes, en particulier la relativité générale. Il est basé sur un ensemble de solutions de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) avec une géométrie symétrique uniforme et tridimensionnelle avec trois courbes possibles : positive (espace sphérique), zéro (espace euclidien) et négative (espace hyperbolique).

Les caractéristiques de base des modèles basés sur les solutions FLRW, qui peuvent être considérées comme le noyau dur du programme de recherche cosmologique connexe, sont : les modèles sont dynamiques (univers en constante évolution), le taux d'expansion de l'univers varie selon les différents types de matériau dominant, et les modèles FLRW ont une singularité dans un temps fini dans le passé (Big Bang).

---

[491] Laura Ferrarese et David Merritt, « A Fundamental Relation Between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies », *The Astrophysical Journal* 539, nº 1 (10 août 2000): 539 (1): 9–12, https://doi.org/10.1086/312838.

[492] Valerio Bozza, « Gravitational Lensing by Black Holes », *General Relativity and Gravitation* 42, nº 9 (1 septembre 2010): 42 (9): 2269–2300, https://doi.org/10.1007/s10714-010-0988-2.

[493] Charles Q. Choi, « Black Hole Pretenders Could Really Be Bizarre Quantum Stars », Scientific American, 2018, https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-pretenders-could-really-be-bizarre-quantum-stars/.

[494] Philip Ball, « Black Holes "Do Not Exist" », *Nature*, 31 mars 2005, news050328-8, https://doi.org/10.1038/news050328-8.

[495] Lemaître, « A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulæ ».

Dans le cas des modèles FKRW, il existe deux types de tests d'observation pour leur vérification : sont étudiées la géométrie de l'espace de fond et son évolution en utilisant la matière et le rayonnement dans l'univers, ou est étudié le mode de formation de la structure du modèle qui décrit l'évolution des petites perturbations.

L'étude observationnelle de la géométrie de l'univers montre qu'il est isotrope à des échelles suffisamment grandes, selon les données résultant du fond diffus cosmologique (FDC) et de sources discrètes (galaxies, etc.). L'étude de la formation de la structure du modèle utilise un petit nombre de paramètres pour des observations de différentes périodes, en utilisant des anisotropies de température dans le FDC et le spectre de puissance de la matière en observant les galaxies comme contraintes indépendantes de ces paramètres et des paramètres de fond. [496]

Le modèle cosmologique standard comprend plusieurs périodes de l'évolution de l'univers traitées séparément dans les vérifications expérimentales et observationnelles : [497]

- *Gravité quantique* : la période de début, où les effets quantiques étaient essentiels pour décrire les phénomènes
- *Inflation* : une période d'expansion exponentielle de l'univers, au cours de laquelle les substances et les rayonnements préexistants sont rapidement dilués, puis l'univers est repeuplé en matière et en énergie en dégradant le champ dans d'autres zones à la fin de l'inflation (« *réchauffage* »).
- *Nucléosynthèse du Big Bang* : la période au cours de laquelle les constituants de l'univers comprennent les neutrons, les protons, les électrons, les photons et les neutrinos, étroitement couplés dans l'équilibre thermique local et les éléments légers apparaissent.
- *Découplage* : les électrons se lient dans des atomes stables et les photons se découplent avec la matière ; au fur et à mesure que l'univers se dilate, les photons se refroidissent adiabiquement mais conservent un spectre du rayonnement cosmique de fond du corps noir qui contient beaucoup d'informations sur l'état de l'univers au découplage. [498]
- *Période noire* : après découplage, la matière baryonique formée d'hydrogène neutre et d'hélium coagule en étoiles ; l'âge noire se termine avec l'apparition de la lumière des étoiles.
- *Formation de structure* : la première génération d'étoiles s'agrège en galaxies et les galaxies en clusters ; Les étoiles massives se retrouvent dans des explosions de supernovaes et propagent un espace lourd créé à l'intérieur, formant la deuxième génération d'étoiles entourées de planètes.

---

[496] Christopher Smeenk et George Ellis, « Philosophy of Cosmology », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Winter 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmology/.

[497] Smeenk et Ellis.

[498] P. a. R. Ade et al., « Planck 2015 Results - XX. Constraints on Inflation », *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octobre 2016): 594: A20, https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525898.

- *Domination de l'énergie noire* : l'énergie noire (ou une constante cosmologique non nulle) domine l'expansion de l'univers, entraînant une expansion accélérée ; l'expansion se poursuivra indéfiniment si l'énergie noire est en fait une constante cosmologique[499].

Le modèle cosmologique standard comprend plusieurs paramètres libres, tels que la densité d'abondance de différents types de matière, qui peuvent être mesurés de plusieurs manières avec des hypothèses théoriques distinctes et des sources d'erreur. À l'heure actuelle, il existe de grandes différences entre les différentes méthodes de mesure, et l'importance et les implications de ces différences ne sont pas encore claires.

Le modèle standard de nucléosynthèse est confirmé par plusieurs preuves indépendantes pour éliminer les erreurs théoriques isolées ou les sources d'erreurs systématiques.

Bien qu'il soit le plus complet, le modèle cosmologique standard rencontre trois problèmes qui impliquent la nécessité d'une nouvelle physique[500] : il n'y a pas de description complète de la nature ou de la dynamique de la matière noire[501], de l'énergie noire[502] et du champ inflationniste[503] ; la formation de galaxies[504] ; et la possible réfutation du modèle si des objets dans l'univers avec un âge supérieur à celui déterminé de l'univers étaient découverts, par env. 13,7 milliards d'années.[505]

Il existe une opinion selon laquelle les preuves cosmologiques actuelles ne sont pas suffisantes pour déterminer la théorie scientifique à choisir, et chaque théorie selon un nombre donné de données offre des descriptions très différentes du monde. Duhem[506] a caractérisé la difficulté de

---

[499] Une autre explication, selon la théorie des cordes, est que l'univers a plusieurs dimensions et que la gravité perd de gravitons se déplaçant d'une dimension à l'autre.

[500] Smeenk et Ellis, « Philosophy of Cosmology ».

[501] Gianfranco Bertone, Dan Hooper, et Joseph Silk, « Particle dark matter: evidence, candidates and constraints », *Physics Reports* 405, nº 5 (1 janvier 2005): 405(5–6): 279–390, https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031.

[502] Peebles et Ratra, « The cosmological constant and dark energy », 75(2): 559–606.

[503] David H. Lyth et Antonio Riotto, « Particle physics models of inflation and the cosmological density perturbation », *Physics Reports* 314, nº 1 (1 juin 1999): 314(1–2): 1–146, https://doi.org/10.1016/S0370-1573(98)00128-8.

[504] Joseph Silk, « Formation of Galaxies », The Philosophy of Cosmology, avril 2017, 161–178, https://doi.org/10.1017/9781316535783.009.

[505] G. F. R. Ellis et J. E. Baldwin, « On the Expected Anisotropy of Radio Source Counts », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 206, nº 2 (1 janvier 1984): 206(2): 377–381, https://doi.org/10.1093/mnras/206.2.377.

[506] Duhem, Vuillemin, et Broglie, *The Aim and Structure of Physical Theory*.

choisir les théories physiques, et Quine[507] a plaidé pour la sous-détermination. La difficulté réside dans la caractérisation du contenu empirique des théories. Van Fraassen (1980) définit une théorie comme « empiriquement appropriée » si ce qui est dit sur les phénomènes observables est vrai. En cosmologie, les caractéristiques de base du modèle standard imposent deux limites fondamentales : la finitude de la vitesse de la lumière et le fait que les théories qui peuvent être testées par leurs implications pour la cosmologie impliquent des énergies trop grandes pour être testées sur Terre.

Le programme de recherche de la cosmologie observationnelle[508] [509] montre dans quelle mesure un ensemble idéal d'observations peut déterminer la géométrie spatio-temporelle à partir d'un minimum d'hypothèses cosmologiques. L'ensemble de données idéal comprend des objets astrophysiques qui peuvent être utilisés comme normes pour déterminer les propriétés et l'évolution de certaines sources. Dans la pratique, les observateurs n'ont pas accès à l'ensemble de données idéal, de sorte qu'ils ont du mal à comprendre la nature des sources et leur évolution.

Selon Christopher Smeenk et George Ellis, le problème en cosmologie est la discrimination entre les modèles d'une théorie donnée, plutôt que le choix entre des théories concurrentes. Ils donnent comme exemple la symétrie globale supposée dans la dérivation des modèles FLRW. Toutes les preuves existantes sont également compatibles avec les modèles où cette symétrie n'est pas valide. Une possibilité serait qu'elle soit considérée *a priori*, ou comme une condition préalable à la théorisation cosmologique[510]. Récemment, la justification des modèles FLRW a été essayée, en utilisant un autre principe général plus faible, en conjonction avec des théorèmes liés à l'homogénéité et à l'isotropie. Le théorème d'Ehlers-Geren-Sachs[511] montre que si tous les observateurs géodésiques dans un modèle où l'expansion est acceptée déterminent que le rayonnement de fond se propageant librement est exactement isotrope, alors le modèle FLRW est confirmé. Si le passé causal est « typique », les observations le long de la ligne de notre univers contraindront ce que les autres observateurs peuvent voir (le principe copernicien). Ce principe peut être testé indirectement, en vérifiant l'isotropie grâce à l'effet Sunyaev-Zel'dovich. D'autres

---

[507] W. V. Quine, « On the Reasons for Indeterminacy of Translation », The Journal of Philosophy, 1 janvier 1970, 67(6): 178–183, https://doi.org/10.2307/2023887.

[508] J. Kristian et R. K. Sachs, « Observations in Cosmology », *The Astrophysical Journal* 143 (1 février 1966): 143: 379-399, https://doi.org/10.1086/148522.

[509] G. F. R. Ellis et al., « Ideal observational cosmology », *Physics Reports* 124, nº 5 (1 juillet 1985): 124(5–6): 315–417, https://doi.org/10.1016/0370-1573(85)90030-4.

[510] Claus Beisbart, « Can We Justifiably Assume the Cosmological Principle in Order to Break Model Underdetermination in Cosmology? », *Journal for General Philosophy of Science* 40, nº 2 (1 décembre 2009): 40(2): 175–205, https://doi.org/10.1007/s10838-009-9098-9.

[511] J. Ehlers, P. Geren, et R. K. Sachs, « Isotropic Solutions of the Einstein-Liouville Equations », *Journal of Mathematical Physics* 9, nº 9 (1 septembre 1968): 9(9): 1344–1349, https://doi.org/10.1063/1.1664720.

tests sont directs avec un ensemble de normes suffisamment bon et un test indirect basé sur le temps écoulé de redirection cosmologique. Cette façon de travailler offre un argument empirique selon lequel l'univers observé est bien approximé par un modèle FLRW, transformant ainsi l'hypothèse philosophique initiale en une base testée par observation. [512]

Le physicien soviétique Yakov Zeldovici a appelé l'ère électrofaible comme « l'accélérateur du pauvre », car en observant l'ère électrofaible il est possible d'étudier les phénomènes de l'univers à partir de la physique des hautes énergies. Pour la gravité quantique, la cosmologie offre le seul moyen pratique d'évaluer des idées concurrentes.

Actuellement, il y a des débats sur la légitimité des différents programmes de recherche en cosmologie. Une réponse consiste à recourir à des modèles hypothético-déductivistes (HD): une hypothèse devient plus fiable à mesure que l'une de ses conséquences est vérifiée, et vice versa. Mais le modèle d'identification a plusieurs aspects contestés (il est souvent appelé « HD naïf », similaire à la contrefaçon naïve de Popper). Le point de vue naïf ne permet pas de distinguer les théories rivales sous-déterminées qui font les mêmes prédictions[513]. Les scientifiques distinguent les théories qui « cadrent tout simplement avec les données », par opposition à celles qui capturent avec précision les lois et évaluent certaines prédictions réussies comme plus révélatrices que d'autres.

Une méthodologie plus sophistiquée peut reconnaître explicitement les critères que les scientifiques utilisent pour évaluer les théories scientifiques[514], qui incluent le pouvoir explicatif et la cohérence avec d'autres théories, en plus de la compatibilité avec les preuves. Ces facteurs doivent être clairs et discriminatoires. Alternativement, certaines des caractéristiques souhaitables peuvent être considérées comme faisant partie de ce qui constitue un succès empirique.

2.4.6.3 Surveillance des lentilles faibles

À l'aide du télescope spatial Hubble et du Very Large Telescope, des tests de relativité générale à l'échelle galactique ont été effectués. La galaxie ESO 325-G004 agit comme une lentille gravitationnelle puissante, déformant la lumière d'une galaxie plus éloignée et créant un anneau d'Einstein autour de son centre. En comparant la masse ESO 325-G004, par des mesures du

---

[512] Smeenk et Ellis, « Philosophy of Cosmology ».

[513] Vincenzo Crupi, « Confirmation », 30 mai 2013, https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/confirmation/.

[514] George F R Ellis, « Issues in the philosophy of cosmology », in *Philosophy of Physics*, éd. par Jeremy Butterfield et John Earman, Handbook of the Philosophy of Science (Amsterdam: North-Holland, 2007), 1183–1286, https://doi.org/10.1016/B978-044451560-5/50014-2.

mouvement des étoiles à l'intérieur de cette galaxie, avec la courbure de l'espace qui l'entoure, la gravité s'est comportée selon la relativité générale. [515]

Les études sur les lentilles faibles en sont à leurs débuts. Les lentilles faibles produisent des distorsions dans l'image apparente de la taille, de la forme et des flux de l'objet astrophysique utilisé comme lentille cosmique. L'étude des lentilles faibles est une bonne méthode pour les tests de la relativité générale et une preuve solide de l'existence de l'énergie noire et de la matière noire. [516]

Reyes et d'autres ont mesuré le « glissement gravitationnel » comme la différence entre deux potentiels gravitationnels différents qui définissent les perturbations de la matière. Dans la relativité générale, cette valeur est nulle ou très petite, mais dans d'autres théories, elle est différente de zéro et conduit à des différences substantielles dans la puissance des lentilles gravitationnelles. [517]

Plus récemment, Blake et al. [518] ont effectué des tests de relativité générale similaires sur des distances cosmologiques, en utilisant des données spectroscopiques et l'imagerie. Ils ont constaté que les résultats valident la relativité générale.

2.5 Les anomalies de la relativité Générale

Au fil du temps, la théorie de la relativité générale a accumulé plusieurs anomalies, indiquant la nécessité de meilleures théories sur la gravité ou d'autres approches:

- Les étoiles dans les galaxies ont une distribution de vitesses croissantes du centre vers la périphérie, avec une plus grande variation que prévu. Il en va de même pour les galaxies dans les clusters de galaxies. L'hypothèse de la matière noire, qui interagirait par gravité mais pas électromagnétiquement, pourrait expliquer la différence. Il existe également divers changements dans la dynamique newtonienne qui peuvent expliquer cette anomalie, comme la théorie MOND.
- Les vaisseaux spatiaux ont connu une accélération supérieure à celle prévue lors des manœuvres gravitationnelles.

---

[515] Thomas E. Collett et al., « A Precise Extragalactic Test of General Relativity », *Science* 360, nº 6395 (22 juin 2018): 360 (6395): 1342–1346, https://doi.org/10.1126/science.aao2469.

[516] Yong-Seon Song et Olivier Doré, « A step towards testing general relativity using weak gravitational lensing and redshift surveys », *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2009, nº 03 (23 mars 2009): 025, https://doi.org/10.1088/1475-7516/2009/03/025.

[517] Reinabelle Reyes et al., « Confirmation of general relativity on large scales from weak lensing and galaxy velocities », *Nature* 464, nº 7286 (mars 2010): 464(7286: 256–258, https://doi.org/10.1038/nature08857.

[518] Chris Blake et al., « RCSLenS: Testing Gravitational Physics through the Cross-Correlation of Weak Lensing and Large-Scale Structure », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, nº 3 (1 mars 2016): 456(3): 2806–2828, https://doi.org/10.1093/mnras/stv2875.

- L'expansion métrique de l'espace semble s'accélérer. L'énergie noire a été introduite comme hypothèse pour expliquer cela. Une explication récente est que la géométrie spatiale n'est pas homogène en raison des clusters de galaxies, mais cette hypothèse est contestée. [519]
- Des mesures récentes montrent que les orbites planétaires croissent plus vite que prévu par la perte de la masse du Soleil par l'énergie radiative.
- Les photons du rayonnement cosmique devraient gagner de l'énergie puis la perdre en cours de route, mais en réalité ils gagnent deux fois plus d'énergie que prévu par la théorie. Une hypothèse serait que la gravité diminue plus rapidement que le carré inverse à certaines distances.
- Nuages d'hydrogène massifs supplémentaires: les raies spectrales Lyman-alpha suggèrent que les nuages d'hydrogène sont plus encombrés à certaines échelles que prévu et, comme le flux noire, peuvent indiquer que la gravité diminue plus lentement que les carrés inverses à certaines échelles de distance. [520]

Les hypothèses *ad hoc* introduites en relativité générale pour expliquer les singularités gravitationnelles basées sur les conditions énergétiques ne sont pas très efficaces. Des hypothèses plus détaillées sur le contenu du sujet sont nécessaires[521]. De nombreux scientifiques et philosophes sont parvenus à la conclusion que les singularités doivent être associées à l'atteinte des limites de la validité physique de la relativité générale et qu'une nouvelle théorie, la gravité quantique, doit être développée.

Une singularité qui peut influencer causalement certaines parties de l'espace est appelée *singularité nue*. Penrose a proposé l'élimination des singularités nues en utilisant l'hypothèse de censure cosmique[522]. La démonstration de l'hypothèse de la censure cosmique est l'un des problèmes mathématiques centraux de la relativité générale.

Selon certains scientifiques, la relativité générale contient les germes de sa propre destruction, car la théorie n'est pas en mesure de prédire la physique à l'échelle de Planck, et des problèmes tels que la non-renormalisation et les singularités sont des « inconnus connus ».[523]

2.6 Le point de saturation de la relativité générale

---

[519] Anil Ananthaswamy, « Swiss-Cheese Model of the Cosmos Is Full of Holes », New Scientist, 2008, https://www.newscientist.com/article/mg20026783-800-swiss-cheese-model-of-the-cosmos-is-full-of-holes/.

[520] Marcus Chown, « Gravity May Venture Where Matter Fears to Tread », New Scientist, consulté le 3 mai 2019, https://www.newscientist.com/article/mg20126990-400-gravity-may-venture-where-matter-fears-to-tread/.

[521] Alan D. Rendall, « The nature of spacetime singularities », *arXiv:gr-qc/0503112*, novembre 2005, 76-92, https://doi.org/10.1142/9789812700988_0003.

[522] R. Penrose, « Singularities and time-asymmetry. », 1979, 581-638, http://adsabs.harvard.edu/abs/1979grec.conf..581P.

[523] Tong, *String Theory*.

Selon la méthodologie des programmes de recherche de Lakatos, la relativité générale peut être divisée en plusieurs périodes: la période initiale, la période de stagnation, la période de maturité et le point de saturation. La période initiale (1887-1919) comprend les deux grandes expériences de physique relativiste, l'expérience Michelson-Morley et l'expérience Eotvos, et les deux confirmations, la déformation de la lumière et l'avance du périhélie de Mercure. Il s'ensuit une période de stagnation (1920-1960) au cours de laquelle la théorie a progressé plus vite que les possibilités technologiques et expérimentales, étant même retirée des manuels de physique et d'astronomie.

La maturité de la théorie commence en 1960, lorsque des découvertes astronomiques et de nouvelles expériences ont attiré l'attention sur la RG. Cette période (1960 - 1980) a été désignée par Will comme un « âge d'or »[524], dans lequel les prévisions observables de la RG ont été comparées par rapport à d'autres théories alternatives, et de nouvelles expériences ont été proposées pour les tests. La première expérience de cette période a été développée pour confirmer le changement de fréquence gravitationnelle de la lumière (1960) et s'est terminée par la confirmation de la prédiction de la RG de la perte d'énergie des ondes gravitationnelles (1979) en observant le pulsar binaire Hulse-Taylor.

A partir de 1980 commença la zone de saturation de la RG, appelée par Will « la recherche d'une gravité forte ». Certaines des nouvelles prédictions de la théorie sont insignifiantes et difficiles à vérifier, nécessitant dans certains cas des technologies encore sous-développées. La théorie a commencé à être attaquée par de nouvelles théories ou techniques expérimentales, telles que l'utilisation d'atomes et de pièges d'ions refroidis par laser pour effectuer des tests ultra-précis, proposant une « cinquième » force, ou des dimensions supplémentaires pour tester la loi carrée inverse de la gravité. De plus en plus d'attention a commencé à être portée aux effets des champs gravitationnels forts, près de l'horizon de l'événement d'un trou noir non tournant, dans les étoiles à neutrons ou, pour l'univers étendu, aux champs gravitationnels associés à l'échelle de Planck.

Dans les équations d'Einstein de la relativité générale classique, il reste une asymétrie fondamentale entre les champs gravitationnel et non gravitationnel: à gauche, un objet géométrique ($g_{\mu\nu}$, le tenseur d'Einstein), représentant la courbure de l'espace-temps, est identique à la représentation phénoménologique du tenseur, mais pas -géométrique, de la matière du côté droit.

$$(1)\quad G_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}, \text{ unde } G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}R$$

Ainsi, dans sa conférence pour le prix Nobel en juillet 1923, Einstein a déclaré:

> « Ceux qui recherchent l'unification de la théorie ne peuvent se contenter de l'existence de deux domaines qui, de par leur nature, sont assez indépendants. Une théorie mathématique unifiée des

[524] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

> champs est recherchée, dans laquelle le champ gravitationnel et le champ électromagnétique sont interprétés comme des composants ou des manifestations du même champ uniforme. La théorie gravitationnelle, considérée en termes de formalisme mathématique, c'est-à-dire la géométrie riemannienne, doit être généralisée comme suit pour inclure les lois du champ électromagnétique. »[525]

Il existe des preuves théoriques qui ne tiennent pas compte du PEE dans certains cas, à travers des effets gravitationnels quantiques, des effets dérivés de la théorie des cordes, ou à travers d'autres interactions non détectées jusqu'à présent. Dans la théorie des cordes, il existe de tels domaines qui violent le principe d'équivalence d'Einstein (PEE), mais la théorie n'est pas encore suffisamment mûre pour matérialiser une telle réfutation. Clifford M. Will déclare que l'observation d'effets qui semblent violer le PEE est, dans une certaine mesure, sémantique. Les champs impliqués dans la théorie des cordes peuvent être de longues distances et peuvent imiter les champs gravitationnels, mais aucun moyen n'a été trouvé pour le faire[526]. L'idée d'utiliser les tests PEE de cette manière est apparue dans les années 1980, à la recherche d'une « cinquième » force[527] comme une force d'environ un pour cent de la gravité mais avec une portée de plusieurs centaines de mètres, impliquant une déviation de la loi du carré inverse de la gravité newtonienne. L'idée est née de l'utilisation de mesures du profil de gravité des mines profondes en Australie et de nouvelles idées en physique des particules, suggérant la présence possible de très petites particules de gravité. De nombreuses expériences ont cherché des preuves de cette force en mesurant les différences d'accélération par composition, mais les résultats n'ont pas été concluants, le consensus étant qu'il n'y a aucune preuve expérimentale crédible pour une cinquième force. [528]

La possibilité que la loi du carré inverse soit violée à des intervalles très courts lors des contrôles en laboratoire[529] prévoyait que certaines des dimensions spatiales supplémentaires de la théorie des cordes puissent s'étendre au-delà des échelles macroscopiques. À petite échelle, la gravité s'écarte de la loi connue. De nombreuses méthodes de haute précision et à faible bruit ont été développées,

---

[525] Albert Einstein, *Fundamental Ideas and Problems of the Theory of Relativity: Lecture Delivered to the Nordic Assembly of Naturalists at Göteborg on July 11, 1923* (Nobel Museum, 2009), 489.

[526] Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

[527] Fischbach et al., « Reanalysis of the Eotvos experiment », 56, 3–6.

[528] C. M. Will, « Twilight time for the fifth force? », 1990, 80, 472–479, http://connection.ebscohost.com/c/articles/9011192203/twilight-time-fifth-force.

[529] Lisa Randall et Raman Sundrum, « An Alternative to Compactification », *Physical Review Letters* 83, nº 23 (6 décembre 1999): 83, 4690–4693, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690.

adaptées aux tests de laboratoire. Aucun écart par rapport à la loi du carré inverse n'a été trouvé. [530]

Les singularités gravitationnelles sont considérées comme une limite d'espace-temps. La relativité générale permet l'existence de singularités, mais elle ne peut rien dire sur ce qui se passe à l'intérieur, et les scientifiques ne se sont pas encore mis d'accord sur une définition de celles-ci, prenant également en compte le fait que sans une géométrie conforme aux lois. les physiciens ne peuvent pas avoir de localisation spatio-temporelle. En conclusion, disent-ils, on ne peut parler de singularités, mais plutôt d'espaces-temps singuliers, bien qu'en principe ces termes soient équivalents[531]. Clarke[532] et Earman[533], ainsi que Geroch, Can-bin et Wald[534] et Curiel[535], soutiennent qu'une définition précise, rigoureuse et univoque de la singularité est nécessaire pour une meilleure approche et une modélisation plus précise des aspects spatio-temporels[536]. Il est communément admis que la relativité générale, considérant l'espace-temps comme singulier, prédit sa propre incapacité à limiter les singularités des trous noirs et du Big Bang, en niant leur réalité. On espère qu'une théorie plus fondamentale, peut-être la gravité quantique, résoudra ce problème. [537]

Les trous noirs apparaissent, selon la relativité générale, lorsque le corps cosmique s'effondre sous le soi-disant rayon de Schwarzschild, proportionnel à la masse corporelle. L ‘ « horizon des événements » d'un trou noir est le point où il n'y a pas de retour en arrière, dans lequel l'attraction gravitationnelle est plus grande que toute tentative de sortie de cette zone, y compris pour la

---

[530] Joshua C. Long et al., « Upper Limits to Submillimetre-Range Forces from Extra Space-Time Dimensions », *Nature* 421, nº 6926 (février 2003): 421, 922–925, https://doi.org/10.1038/nature01432.

[531] Erik Curiel, « Singularities and Black Holes », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Spring 2019 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019), https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/spacetime-singularities/.

[532] C. J. S. Clarke, « The Analysis of Space-Time Singularities by C. J. S. Clarke », Cambridge Core, mai 1994, https://doi.org/10.1017/CBO9780511608155.

[533] John Earman, « Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes », *British Journal for the Philosophy of Science* 49, nº 2 (1998): 338–347.

[534] Robert Geroch, Liang Can-bin, et Robert M. Wald, « Singular boundaries of space–times », *Journal of Mathematical Physics* 23, nº 3 (1 mars 1982): 23(3): 432–435, https://doi.org/10.1063/1.525365.

[535] Erik Curiel, « The Analysis of Singular Spacetimes », *Philosophy of Science* 66, nº 3 (1999): 66(S1): S119–S145.

[536] Nicolae Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale* (MultiMedia Publishing, 2018), http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242.

[537] Abhay Ashtekar et Martin Bojowald, « Quantum geometry and the Schwarzschild singularity », *Classical and Quantum Gravity* 23, nº 2 (21 janvier 2006): 23(2): 391–411, https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/2/008.

lumière[538]. Pour un trou noir standard (non chargé, non rotatif), l'horizon de l'événement se situe dans le rayon de Schwarzschild. Du point de vue d'une personne en dehors de l'horizon des événements, le temps près d'un trou noir est retardé en raison de la gravité forte, jusqu'à ce que les intervalles de temps atteignent infiniment grand dans les horizons des événements. Du point de vue de la personne entrant dans l'horizon des événements, rien d'inhabituel ne se produit. Le temps passe de la même manière et il ne se rend pas compte qu'il est entré dans l'horizon des événements.

Les trous noirs relativistes sont des entités purement gravitationnelles. Ce sont des solutions de « vide » des équations de champ d'Einstein. Dans le contexte de la relativité générale, Erik Curiel déclare que la gravité est abandonnée et qu'une géométrie courbe de l'espace-temps est postulée qui produit tous les effets de la gravité, le trou noir n'est pas une « chose » dans l'espace, mais une caractéristique de l'espace-temps lui-même[539]. La matière de l'étoile qui s'effondre disparaît dans l'unicité du trou noir, ne restant que les propriétés géométriques du trou noir (masse, charge et moment angulaire), selon les théorèmes appelés « de calvitie », quelles que soient les propriétés physiques antérieures des objets qui s'effondrent dans un trou noir.

Une singularité « nue » n'a pas d'horizon des événements. Cela implique une rupture fondamentale dans la structure de l'espace-temps. [540] [541] Une version d'une singularité nue est le « trou blanc », un trou noir inversé dans le temps, d'où la matière et les objets du néant pourraient apparaître. Étant donné que les équations du domaine de la relativité générale ne sélectionnent pas une direction du temps préférée et que la formation d'un trou noir est autorisée, les trous blancs seront autorisés par ces lois[542]. Roger Penrose affirme que des singularités nues ne se formeront jamais, introduisant une hypothèse *ad hoc* appelée « hypothèse de censure cosmique »: une singularité sera toujours dans un trou noir entouré par l'horizon des événements. En raison de contre-exemples, cette hypothèse a été abandonnée au fil du temps. Plusieurs hypothèses alternatives ont été proposées pour éliminer la possibilité des singularités nues qui violent le principe de causalité[543] [544], mais aucune n'est jugée satisfaisante à ce jour.

Les trous noirs constituent un terrain d'essai essentiel pour les problèmes conceptuels qui sous-tendent la gravité quantique et la relativité générale, concernant la violation de la conservation de

---

[538] Une description plus précise distingue d'autres types d'horizon, tels que les horizons apparents, cf. Hawking et al., *The Large Scale Structure of Space-Time*.

[539] Curiel, « Singularities and Black Holes ».

[540] Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale*.

[541] Earman, « Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks », 65-66.

[542] Curiel, « Singularities and Black Holes ».

[543] Pankaj S. Joshi, « Cosmic Censorship: A Current Perspective », *arXiv:gr-qc/0206087*, 28 juin 2002, 17(15): 1067–1079, http://arxiv.org/abs/gr-qc/0206087.

[544] Earman, « Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks », chap. 3.

l'énergie et de la micro-causalité, et le paradoxe de la perte d'informations. La gravité quantique semble être le meilleur candidat pour modéliser ces phénomènes.

En 1971, Hawking a introduit la conjecture que la surface totale des horizons d'événements dans tout groupe de trous noirs ne diminue pas, même s'ils s'unissent (la deuxième loi de la mécanique des trous noirs, par similitude avec l'entropie en thermodynamique) [545]. Pour empêcher les trous noirs d'avoir une entropie nulle, Bekenstein a proposé qu'un trou noir ait une entropie proportionnelle à la surface de son horizon[546]. Hawking a découvert que la théorie des champs quantiques prédit qu'un trou noir se comporte comme un corps noir rayonnant à température constante, violant ainsi la deuxième loi de la mécanique des trous noirs en raison de la perte d'énergie et donc du rétrécissement. Mais le rayonnement supprime également l'entropie, et donc la quantité d'entropie de la matière augmente. Cela permet la formulation de la première loi de la mécanique des trous noirs similaire à la première loi de la thermodynamique, avec la masse agissant comme énergie, la gravité de la surface comme température et l'aire comme entropie[547]. Dans cette interprétation du trou noir, la relativité générale n'est pas satisfaisante et une meilleure théorie de la gravité quantique est nécessaire. [548]

Un trou noir contient uniquement des informations sur la masse totale, la charge et le moment angulaire. La théorie des trous noirs stables affirme que cette perte n'est pas un problème, car l'information peut être considérée comme étant présente dans le trou noir, inaccessible de l'extérieur mais représentée à l'horizon de l'événement selon le principe holographique. Mais dans la théorie selon laquelle les trous noirs s'évaporent lentement sous le rayonnement de Hawking, les informations sur la matière qui a formé le trou noir sont irrémédiablement perdues. En mécanique quantique, la perte d'information correspond à la violation de l'unité, liée à la conservation de la probabilité, entraînant la violation de la conservation de l'énergie[549]. Des études récentes montrent

---

[545] S. W. Hawking, « Gravitational Radiation from Colliding Black Holes », *Physical Review Letters* 26, nº 21 (24 mai 1971): 26 (21): 1344–1346, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1344.

[546] Robert M. Wald, « The Thermodynamics of Black Holes », *Living Reviews in Relativity* 4, nº 1 (9 juillet 2001): 4 (1): 6, https://doi.org/10.12942/lrr-2001-6.

[547] Wald, 4 (1): 6.

[548] S. Carlip, « Black Hole Thermodynamics and Statistical Mechanics », in *Physics of Black Holes: A Guided Tour*, éd. par Eleftherios Papantonopoulos, Lecture Notes in Physics (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009), 769: 89–123, https://doi.org/10.1007/978-3-540-88460-6_3.

[549] Steven B. Giddings, « The black hole information paradox », *arXiv:hep-th/9508151*, 28 août 1995, http://arxiv.org/abs/hep-th/9508151.

que l'information et l'unité sont néanmoins préservées dans un traitement quantique du problème. [550]

Dans le cas d'un corps tombant dans un trou noir, la théorie du champ quantique dans l'espace courbe implique des quantités de rayonnement Hawking, y compris seulement une quantité finie d'informations codées dans le rayonnement Hawking. Mais l'inséparabilité de la particule à la sortie de tout le rayonnement de Hawking que le trou noir a précédemment émis crée un paradoxe appelé « la monogamie de l'inséparabilité » [551]. Pour résoudre le paradoxe, l'une des trois théories testées au fil du temps doit être écartée : le principe d'équivalence d'Einstein, l'unitarité, ou la théorie du champ quantique existant. La renonciation au principe d'équivalence implique un « écran » qui détruit les particules d'entrée à l'horizon de l'événement[552]. Les données LIGO 2016 montrent des signaux d'écho possibles dus à un horizon flou des événements, possibles dans les théories de l'écran, mais impossibles en relativité classique générale. [553]

Le besoin de cohérence entre la théorie quantique et la relativité générale[554], et l'existence des singularités, nécessitent l'émergence d'une théorie complète de la gravité quantique[555]. Jusqu'à présent, une théorie aussi complète et cohérente n'a pas réussi à se développer, bien qu'il existe plusieurs candidats. [556]

---

[550] Samir D. Mathur, « The Information Paradox: Conflicts and Resolutions », *Pramana* 79, nº 5 (1 novembre 2012): 1059-73, https://doi.org/10.1007/s12043-012-0417-z.

[551] Zeeya Merali, « Astrophysics: Fire in the Hole! », *Nature News* 496, nº 7443 (4 avril 2013): 20–23, https://doi.org/10.1038/496020a.

[552] Jennifer Ouellette, « Black Hole Firewalls Confound Theoretical Physicists », Scientific American, 2012, https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-firewalls-confound-theoretical-physicists/.

[553] Zeeya Merali, « LIGO Black Hole Echoes Hint at General-Relativity Breakdown », *Nature News*, 2016, 540, https://doi.org/10.1038/nature.2016.21135.

[554] S. Carlip, « Quantum Gravity: a Progress Report », *Reports on Progress in Physics* 64, nº 8 (1 août 2001): sect. 2, https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301.

[555] Schutz, « Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz », 407.

[556] Herbert W. Hamber, *Quantum Gravitation: The Feynman Path Integral Approach* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009), https://www.springer.com/gp/book/9783540852926.

La généralisation de la théorie du champ quantique de la physique des particules élémentaires pour inclure la gravité a échoué[557]. Aux basses énergies, la théorie est acceptable, mais aux très hautes énergies, les résultats sont très divergents et conduisent à des modèles sans pouvoir prédictif. [558]

Une tentative d'éliminer ces limitations est la théorie des cordes, une théorie quantique. La théorie promet une unification de la gravité avec les autres forces, complétant les trois dimensions spatiales par six autres[559]. Une nouvelle version de la théorie, la théorie des supercordes, tente d'unifier la relativité générale et la supersymétrie, sous le nom de supergravité[560], et un modèle unificateur hypothétique à onze dimensions, connu sous le nom de théorie M. [561]

Une autre approche utilise la quantification canonique de la théorie quantique dans laquelle, à partir de la relativité générale, on atteint l'équation de Wheeler-deWitt, un analogue de l'équation de Schrödinger, mais qui a été mal défini[562]. En introduisant des hypothèses *ad hoc* (variables) d'Ashtekar, il a développé la théorie de la gravité quantique à boucles. [563]

Il existe de nombreuses autres tentatives pour arriver à une théorie viable de la gravitation quantique, basée sur l'approche de Feynman et le calcul de Regge, des triangulations dynamiques, des ensembles de causalité, des modèles à twistor[564] ou des modèles à trajectoire intégrale de la

---

[557] G. ’t Hooft et M. Veltman, « One-loop divergencies in the theory of gravitation », *Annales de L’Institut Henri Poincare Section (A) Physique Theorique* 20 (1974): 20 (1): 69, http://adsabs.harvard.edu/abs/1974AIHPA..20...69T.

[558] Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume 2: Modern Applications*, 1 edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2005).

[559] M. B. Green, J. H. Schwarz, et E. Witten, « Superstring Theory. Vol. 1: Introduction », *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik* 68, nº 6 (1988): 258-258, https://doi.org/10.1002/zamm.19880680630.

[560] Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume 3: Supersymmetry*, 1st Edition edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2005).

[561] P. K. Townsend, « Four Lectures on M-theory », *arXiv:hep-th/9612121*, 11 décembre 1996, 13: 385, http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121.

[562] Karel Kuchař, « Canonical Quantization of Gravity », *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237–288, https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5.

[563] Abhay Ashtekar et Jerzy Lewandowski, « Background Independent Quantum Gravity: A Status Report », *Classical and Quantum Gravity* 21, nº 15 (7 août 2004): 21 (15): R53–R152, https://doi.org/10.1088/0264-9381/21/15/R01.

[564] Penrose, *The Road to Reality*.

cosmologie quantique[565]. Toutes les théories candidates ont encore des problèmes formels et conceptuels majeurs qui sont difficiles à surmonter jusqu'à présent, notamment l'impossibilité de vérifier les prédictions par des tests expérimentaux. [566]

[565] S. W. Hawking et W. Israel, *Quantum Cosmology, in Three Hundred Years of Gravitation* (Cambridge University Press, 1989), 631–651.

[566] John H. Schwarz, « String Theory: Progress and Problems », *Progress of Theoretical Physics Supplement* 170 (1 mai 2007): 170: 214–226, https://doi.org/10.1143/PTPS.170.214.

3. Gravité quantique

Les dernières décennies indiquent « un flou de la distinction entre les sciences physiques et l'abstraction mathématique ... [reflétant] une tendance croissante à accepter, et dans certains cas à ignorer, de graves problèmes de test. »[567] Oldershaw répertorie des dizaines de problèmes majeurs non liés aux tests de l'ère pré-instrumentiste.

D'un point de vue méthodologique, Newton et Einstein, et plus tard Dirac, ont soutenu sans réserve le principe de la simplicité mathématique en découvrant les nouvelles lois physiques de la nature. Ils ont été rejoints par Poincaré et Weyl. « Pour Dirac, le principe de la beauté mathématique était en partie une morale méthodologique et en partie un postulat sur les qualités de la nature. Il était clairement inspiré par la théorie de la relativité, la relativité générale en particulier, et le développement de la mécanique quantique ... considérations mathématiques-esthétiques ... ils devraient (parfois) primer sur les faits expérimentaux et agir ainsi comme des critères de vérité. »[568]

Eduard Prugovecki déclare que la gravité quantique a nécessité la prise en compte des questions épistémologiques fondamentales, qui peuvent être identifiées en philosophie avec le problème corps-esprit et le problème du libre arbitre[569]. Ces questions ont influencé l'épistémologie de la mécanique quantique sous la forme du « parallélisme psycho-physique » de von Neumann[570] et l'analyse ultérieure de la thèse de Wigner[571] selon laquelle « l'effondrement du paquet d'ondes » se produit dans l'esprit de « l'observateur ». La gravité quantique en cosmologie pose le problème de la liberté de l'expérimentateur de changer les conditions physiques locales, un « observateur » passif. Dans toute théorie qui décrit un seul univers, des questions se posent sur la nature de la causalité au sens philosophique traditionnel.[572]

---

[567] Robert L. Oldershaw, « The new physics—Physical or mathematical science? », *American Journal of Physics* 56, nº 12 (1 décembre 1988): 1076, https://doi.org/10.1119/1.15749.

[568] Helge Kragh, *Dirac: A Scientific Biography*, 1 edition (Cambridge England ; New York: Cambridge University Press, 1990), 277, 284.

[569] Hermann Weyl et Frank Wilczek, *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Revised ed. edition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 2009).

[570] John Von Neumann, *Mathematische grundlagen der quantenmechanik,* (Berlin: J. Springer, 1932).

[571] E. P. Wigner et al., « The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-baked Ideas », *American Journal of Physics* 32, nº 4 (1 avril 1964): 168-81, https://doi.org/10.1119/1.1970298.

[572] Mario Bunge, « The Revival of Causality », in *La Philosophie Contemporaine / Contemporary Philosophy: Chroniques Nouvelles / A New Survey*, éd. par Guttorm Fløistad, International Institute of Philosophy / Institut

Une théorie quantique de la gravité peut être utile pour unifier la relativité générale aux principes de la mécanique quantique, mais des difficultés surgissent dans cette tentative[573]. La théorie qui en résulte n'est pas renormalisable[574] et ne peut pas faire de prédictions physiques significatives. Les développements ultérieurs ont conduit à la théorie des cordes et à la gravité quantique à boucles[575]. La structure de la relativité générale résulterait de la mécanique quantique de l'interaction des particules théoriques sans masse spin-2, appelées gravitons[576], bien qu'il n'y ait aucune preuve concrète de leur existence.

Le dilaton est apparue dans la théorie de Kaluza-Klein, une théorie à cinq dimensions qui combine la gravité et l'électromagnétisme, et plus tard dans la théorie des cordes. L'équation du champ qui régit le dilaton, dérivée de la géométrie différentielle, pourrait faire l'objet d'une quantification[577]. Puisque cette théorie peut combiner des effets gravitationnels, électromagnétiques et quantiques, leur couplage pourrait conduire à un moyen de justifier la théorie à travers la cosmologie et les expériences.

Cependant, la gravité n'est pas normalisable de manière perturbatrice[578]. La théorie doit être caractérisée par un choix de *paramètres de nombre fini* qui, en principe, peuvent être établis par l'expérience. Mais, pour quantifier la gravité, dans la théorie de la perturbation, il existe *une infinité de paramètres indépendant*s nécessaires pour définir la théorie.

International de Philosophie (Dordrecht: Springer Netherlands, 1982), 133-55, https://doi.org/10.1007/978-94-010-9940-0_6.

[573] A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*, 2 edition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010), 172, 434–435.

[574] La renormalisation est une « absorption » de l'infini en redéfinissant un nombre fini de paramètres physiques. Les paramètres physiques (masse, charge, etc.) ont des valeurs parfaitement finies lorsqu'ils sont observés dans des expériences réelles. Dans le cas de la gravité, la théorie perturbative n'est pas renormalisable. Afin de renormaliser la théorie, nous devons introduire une infinité de « paramètres d'absorption », chacun devant être déterminé par l'expérience.

[575] Penrose, *The Road to Reality*, 1017.

[576] S. Deser, « Self-Interaction and Gauge Invariance », *General Relativity and Gravitation* 1, nº 1 (1 mars 1970): 1: 9–18, https://doi.org/10.1007/BF00759198.

[577] T. Ohta et R. B. Mann, « Canonical reduction of two-dimensional gravity for Particle Dynamics », *Classical and Quantum Gravity* 13, nº 9 (1 septembre 1996): 13 (9): 2585–2602, https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/9/022.

[578] Richard P Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995), xxxvi-xxxviii; 211-12.

Il est possible que, dans une théorie correcte de la gravité quantique, les paramètres inconnus infinis soient réduits à un nombre fini qui peut ensuite être mesuré. L'une des possibilités est d'avoir de nouveaux principes de symétrie non découverts qui contraignent les paramètres et les réduisent à un ensemble fini, un chemin suivi par la théorie des cordes.

Il existe plusieurs théories sur la gravité quantique, mais aucune n'est complète et cohérente. Les modèles doivent surmonter des problèmes formels et conceptuels majeurs, y compris la formulation de prévisions qui peuvent être vérifiées par des tests expérimentaux. [579]

La théorie des cordes implique des objets similaires aux cordes se propageant dans un arrière-plan espace-temps fixe, et les interactions entre les cordes fermées donnent lieu à l'espace-temps de manière dynamique. Cela promet d'être une description unifiée de toutes les particules et interactions[580]. Une façon dans la théorie des cordes correspondra toujours à un graviton, mais à cette théorie, des caractéristiques inhabituelles apparaissent, telles que six dimensions supplémentaires de l'espace. Dans une évolution de ce programme, la théorie des supercordes, on a essayé d'unifier la théorie des cordes, la relativité générale et la supersymétrie, connue sous le nom de supergravité dans un modèle hypothétique à onze dimensions connu sous le nom de théorie M. [581]

Les effets gravitationnels quantiques sont extrêmement faibles et donc difficiles à tester. Ces dernières années, les physiciens se sont concentrés sur l'étude des possibilités de tests expérimentaux[582], les plus ciblés étant les violations de l'invariance de Lorentz, les effets gravitationnels quantiques dans le fond micro-ondes cosmique et la décohérence induite par les fluctuations spatio-temporelles.

Les théories de la gravité quantique sont affectées par de nombreux problèmes techniques et conceptuels. Tian Cao soutient que la gravité quantique offre une opportunité unique aux philosophes, leur permettant « une bonne chance de trouver des contributions positives, plutôt que d'analyser philosophiquement ce que les physiciens ont déjà établi. » [583] Carlo Rovelli (l'architecte

---

[579] Abhay Ashtekar, « Loop quantum gravity: four recent advances and a dozen frequently asked questions », in *The Eleventh Marcel Grossmann Meeting* (World Scientific Publishing Company, 2008), 126, https://doi.org/10.1142/9789812834300_0008.

[580] L. E. Ibanez, « The second string (phenomenology) revolution », *Classical and Quantum Gravity* 17, nº 5 (7 mars 2000): 17 (5): 1117–1128, https://doi.org/10.1088/0264-9381/17/5/321.

[581] Townsend, « Four Lectures on M-theory », 13: 385.

[582] Sabine Hossenfelder, « Experimental Search for Quantum Gravity », *arXiv:1010.3420 [gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th]*, 17 octobre 2010, chap. 5, http://arxiv.org/abs/1010.3420.

[583] Tian Yu Cao, « Prerequisites for a Consistent Framework of Quantum Gravity », *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32, nº 2 (2001): 138.

de la gravité quantique à boucles) exhorte les philosophes à ne pas se limiter « à commenter et à polir les théories physiques fragmentaires actuelles, mais à risquer d'essayer de regarder vers l'avenir ». [584]

Les difficultés conceptuelles proviennent principalement de la nature de l'interaction gravitationnelle, en particulier de l'équivalence des masses gravitationnelles et inertielles, qui permet la représentation de la gravité comme la propriété de l'espace lui-même, plutôt que comme un champ propagé dans l'espace-temps. Lorsque la gravité est quantifiée, certaines des propriétés de l'espace-temps sont soumises à des fluctuations quantiques. Mais la théorie quantique implique un fond classique bien défini pour ces fluctuations. [585]

Yoichiro Nambu[586] a étudié la « physique postmoderne » de la gravité quantique, sa distance par rapport aux expériences. Il existe certaines méthodes d'évaluation de la théorie et des contraintes. Leur enquête est un problème de recherche actuel[587]. Audretsch[588] soutient que la recherche sur la gravité quantique va à l'encontre des paradigmes de Kuhn, la gravité quantique coexistant avec plusieurs paradigmes, à la fois bien confirmés et universels. Étant donné que la relativité générale et la théorie quantique prétendent être des théories universelles, toute tension conceptuelle ou formelle entre elles indiquerait que l'universalité d'une ou des deux théories est erronée. Peter Galison[589] soutient que les contraintes mathématiques prennent la place, en gravité quantique, des contraintes empiriques.

La plupart des physiciens concentrent leur attention sur la théorie des cordes, mais la gravité quantique à boucles (GCB) est également un programme actif, comme d'autres programmes. Il est extrêmement difficile de faire des prédictions concrètes dans ces théories. La théorie des cordes est affectée par le manque de prédictions expérimentales testables en raison du nombre extrêmement élevé d'états distincts et par l'absence de principes directeurs pour mettre en évidence les états

[584] Carlo Rovelli, « Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time », in *The Cosmos of Science*, éd. par John Earman et John Norton (University of Pittsburgh Press, 1997), 182.

[585] Steven Weinstein, « Absolute Quantum Mechanics », Preprint, 2000, 52: 67–73, http://philsci-archive.pitt.edu/836/.

[586] Y. Nambu, « Directions of Particle Physics », *Progress of Theoretical Physics Supplement* 85 (1985): 104–110, https://doi.org/10.1143/PTPS.85.104.

[587] Dean Rickles, « A philosopher looks at string dualities », *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 42: 54–67, https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005.

[588] Audretsch, « Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions », 12(2): 322–339.

[589] Peter Galison, *Laws of Nature: Essays on the Philosophic, Scientific, and Historical Dimensions* (Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1995), 369–408.

physiquement significatifs[590]. GCB semble moins affecté par le manque de prédictions, la discrétion des opérateurs de surface et de volume représente des prévisions concrètes de la théorie, avec des conséquences potentiellement vérifiables, rendant la théorie plus vulnérable à la falsification et donc plus scientifique que la théorie des cordes[591]. Mais on ne sait pas comment ces quantités peuvent être réellement observées.

Steven Weinstein et Dean Rickles déclarent qu'il est difficile de développer un test d'observation d'une théorie si nous ne savons pas où regarder ni quoi regarder[592], car la plupart des théories de la gravité quantique semblent ne considérer que de très grandes échelles d'énergie, de l'ordre de 10^{19} GeV, nécessitant un accélérateur de particules de taille galactique pour s'approcher des énergies nécessaires.

Le « test » le plus notable des théories quantiques de la gravité imposé par la communauté à ce jour implique un phénomène qui n'a jamais été observé, le soi-disant rayonnement Hawking des trous noirs. La théorie des cordes et la gravité quantique à boucles ont toutes deux réussi le test, en utilisant différents degrés de liberté microscopique. Erik Curiel[593] a expliqué comment ce test est utilisé comme preuve de la même manière que les preuves empiriques sont utilisées pour justifier une théorie commune. Bien que le résultat de Bekenstein-Hawking n'ait pas le statut factuel empirique, il s'agit d'une forte déduction d'un cadre qui est assez mature, à savoir la théorie des champs quantiques sur un fond spatio-temporel incurvé, qui peut fonctionner comme une contrainte sur les théories possibles.

En gravité quantique, il est particulièrement important de convenir de certaines contraintes pour guider la construction, et une théorie complète de la gravité quantique devrait reproduire les prédictions de la théorie semi-classique de la gravité comme l'une de ses limites possibles[594]. Curiel remet en question la classification des approches de la gravitation quantique selon le mérite scientifique, comme l'élégance et la cohérence, qu'il ne considère pas comme scientifique. Il déclare que le potentiel explicatif des théories doit être pris en compte. Jusqu'à présent, aucun des

---

[590] Steven Weinstein et Dean Rickles, « Quantum Gravity », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Winter 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/quantum-gravity/.

[591] Lee Smolin, *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*, Reprint edition (Boston u.a: Mariner Books, 2007).

[592] Brading, Castellani, et Teh, « Symmetry and Symmetry Breaking ».

[593] Erik Curiel, « Against the Excesses of Quantum Gravity: A Plea for Modesty », *Proceedings of the Philosophy of Science Association* 2001, nº 3 (2001): 68(3): S424–S441.

[594] Weinstein et Rickles, « Quantum Gravity ».

principaux programmes de recherche n'a montré qu'il reproduit correctement le monde à basse énergie. Il semble que les deux théories surmonteront ce défi.[595] [596]

Bryce DeWitt a déclaré que le champ gravitationnel devrait être quantifié pour être cohérent avec la mécanique quantique[597], sur la base de deux prémisses : les arguments logiques et l'analogie entre les champs électromagnétiques et gravitationnels. Mais la longueur de Planck est si petite que les aspects de la réalité qui définissent une théorie de la gravité quantique, tels que « l'émergence », le « phénomène » ou « empiriquement », ne peuvent pas être considérés sous cette dimension.

La première approche de l'interprétation de la théorie quantique était « instrumentiste ». Jeremy Butterfield et Christopher Isham affirment que l'interprétation de la théorie quantique à Copenhague n'est pas seulement comme une interprétation statistique minimale du formalisme quantique en termes de fréquence des résultats de mesure, mais comme insistant sur un domaine classique qui, s'il comprend l'espace et le temps classiques, implique le fait que, en parlant de « gravité quantique », nous avons tort d'essayer d'appliquer la théorie quantique à quelque chose qui appartient au contexte classique de cette théorie. Une théorie quantique de la gravité devrait être évitée, mais on peut essayer de développer une « théorie quantique de l'espace et du temps ».[598]

La vision « littéraliste » implique l'interprétation de la théorie quantique « au plus près » du formalisme quantique. Cela implique deux versions, une d'Everett et une basée sur la logique quantique. Le littéralisme d'Everett a été discuté en relation avec la gravité quantique (en particulier la cosmologie quantique). Son objectif est de résoudre le « problème de mesure »: lorsque la fonction d'onde s'effondre par rapport aux objets macroscopiques (tels que les instruments).

Les théories des valeurs supplémentaires visent à interpréter la théorie quantique, notamment dans le problème de mesure, sans recourir à l'effondrement du vecteur d'état, en postulant des valeurs supplémentaires pour une certaine « quantité préférée », ainsi qu'une règle d'évolution de ces valeurs. Mais, par rapport à la théorie d'Everett, les « valeurs supplémentaires » n'impliquent pas d'autres mondes physiques réels; ils essaient simplement d'être plus précis sur la quantité préférée et la dynamique de ses valeurs. Ces théories sont l'interprétation de DeBroglie-Bohm de « l'onde pilote » de la théorie quantique, et les différents types d'interprétation modale[599]. Fondamentalement, les « valeurs supplémentaires » préservent la dynamique unitaire ordinaire

[595] Thomas Thiemann, « The Phoenix Project: Master Constraint Programme for Loop Quantum Gravity », *Classical and Quantum Gravity* 23, nº 7 (7 avril 2006): 23(7): 2211, https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/7/002.

[596] Mariana Graña, « The Low Energy Limit of String Theory and Its Compactifications with Background Fluxes », *Letters in Mathematical Physics* 78, nº 3 (1 décembre 2006): 78(3): 279–305, https://doi.org/10.1007/s11005-006-0125-z.

[597] Bryce S. DeWitt, « Definition of Commutators via the Uncertainty Principle », *Journal of Mathematical Physics* 3 (1 juillet 1962): 619-24, https://doi.org/10.1063/1.1724265.

[598] Jeremy Butterfield et Chris Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity », in *Physics Meets Philosophy at the Panck Scale* (Cambridge University Press, 2001).

[599] Jeffrey Bub, *Interpreting the Quantum World*, 1st edition (Cambridge: Cambridge University Press, 1999).

(équation de Schrodinger) de la théorie quantique, mais ajoutent des équations qui décrivent l'évolution temporelle de ses valeurs supplémentaires. L'interprétation des ondes pilotes n'a été appliquée qu'au programme de recherche sur la gravité quantique basé sur la géométrie quantique.[600]

Selon Jeremy Butterfield et Christopher Isham, la nouvelle dynamique est plus radicale que les « valeurs supplémentaires ». Il remplace la dynamique habituelle pour résoudre le problème de mesure en supprimant dynamiquement les superpositions. Au cours des dernières années, la nouvelle dynamique, en particulier à la suite des théories de « localisation spontanée » de Ghirardi, Rimini et Weber[601] et Pearle[602], s'est considérablement développée. Penrose a été particulièrement active dans le soutien de cette idée.

Motivations pour une théorie de la gravité quantique, du point de vue de la physique des particules élémentaires et de la théorie quantique des champs:

1. La matière est constituée de particules élémentaires décrites quantiques et interagissant gravitationnellement.
2. La théorie relativiste du champ quantique ne pouvait avoir de sens qu'en incluant la gravité.
3. La gravité quantique aidera à unifier les trois forces fondamentales non gravitationnelles.

Motivations pour une théorie de la gravité quantique, du point de vue de la relativité générale:

1. L'espoir d'éliminer les singularités en introduisant des effets quantiques.
2. L'explication quantique de la nature finale des trous noirs par perte de masse par rayonnement Hawking.
3. La gravité quantique peut aider à expliquer l'univers très précoce, en déduisant d'ici la 4-dimensionnalité de l'espace-temps, et l'origine de l'évolution inflationniste.
4. On espère qu'une théorie de la gravité quantique fournira la cosmologie quantique.

J. Butterfield énumère quatre types d'approches à la recherche d'une théorie de la gravité: [603]

1. *Relativité générale quantifiée*: elle commence par la relativité générale à laquelle un certain type d'algorithme de quantification est appliqué. Deux types de techniques sont utilisés à cet effet: une approche spatio-temporelle à 4 dimensions de la théorie des champs quantiques et une approche canonique à 3 dimensions de l'espace physique. C'était le premier type d'approche.
2. *La relativité générale comme limite à la basse énergie d'une quantification d'une théorie classique différente*. Un algorithme de quantification est appliqué à une certaine théorie

[600] Butterfield et Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity ».

[601] G. C. Ghirardi, A. Rimini, et T. Weber, « Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems », *Physical Review D* 34, nº 2 (15 juillet 1986): D34:470–491, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470.

[602] null Pearle, « Combining Stochastic Dynamical State-Vector Reduction with Spontaneous Localization », *Physical Review. A, General Physics* 39, nº 5 (1 mars 1989): A39:2277–2289.

[603] Butterfield et Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity ».

classique, récupéré comme limite classique de la nouvelle théorie quantique. Ce type d'approche est illustré par le principal programme de recherche actuel: la théorie des supercordes. Il y a eu plusieurs tentatives pour construire des théories quantiques de la topologie et des structures causales.

3. *La relativité générale en tant que limite de basse énergie d'une théorie quantique qui n'est pas une quantification d'une théorie classique*: il est envisagé de construire une théorie quantique à partir de zéro sans référence à une théorie classique, sans une certaine limite classique.
4. *Partir de zéro avec une nouvelle théorie radicale*: une théorie qui diffère à la fois de la relativité générale et de la théorie quantique se développe.

Les principes fondamentaux de la relativité générale et de la théorie quantique sont si incompatibles que toute réconciliation nécessitera de repenser les catégories d'espace, de temps et de matière. Actuellement, le programme dominant est celui des supercords, du second type. La gravité quantique canonique dans l'approche Ashtekar est du premier type.

La construction d'une théorie de la gravité quantique est associée à deux *hypothèses*: les notions classiques d'espace et de temps ne sont que des concepts approximativement valables, résultant de la nature « réelle » quantique de l'espace et du temps[604], et la gravité quantique fournira la physique classique à un niveau plus profond. [605] [606]

Le *problème de mesure* implique que la théorie quantique ne peut, en elle-même, expliquer aucun phénomène classique - comme les résultats de mesure définis avec un espace bien défini - les propriétés temporelles et énergétiques[607]. Le besoin de relativité générale pour la gravité quantique est quelque peu analogue au besoin de mécanique classique pour la mécanique quantique, le rôle de la relativité générale dans le premier cas étant de préciser la portée de la théorie quantique. Mais la gravité quantique peut contourner le besoin d'une théorie classique en choisissant une interprétation différente de la mécanique quantique.

Une première tentative pour développer une théorie de la gravité quantique a été le couplage de la relativité générale (RG) et la théorie quantique des champs (TCC), formant les soi-disant théories semi-classiques[608]. Dans ces théories, les domaines de la matière sont des structures théoriques

---

[604] J. Butterfield et C. J. Isham, « On the Emergence of Time in Quantum Gravity », *arXiv:gr-qc/9901024*, 8 janvier 1999, 111-68, http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901024.

[605] Steven Weinberg, *Dreams Of A Final Theory: The Search for The Fundamental Laws of Nature* (Random House, 2010).

[606] Max Tegmark et John Archibald Wheeler, « 100 Years of the Quantum », *arXiv:quant-ph/0101077*, 17 janvier 2001, 68-75, http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101077.

[607] Henrik Zinkernagel, « The Philosophy Behind Quantum Gravity », *Theoria : An International Journal for Theory, History and Fundations of Science* 21, nº 3 (2010): 295–312.

[608] S. Carlip, « Is Quantum Gravity Necessary? », *Classical and Quantum Gravity* 25, nº 15 (7 août 2008): 154010, https://doi.org/10.1088/0264-9381/25/15/154010.

quantiques fondamentales, et la gravité, c'est-à-dire l'espace-temps, est fondamentalement classique (non quantique). Fondamentalement, une telle théorie réécrit les équations d'Einstein.

Actuellement, la « gravité quantique » (GC) est un rapprochement plus substantiel de la quantification de la gravité[609], construisant une théorie quantique dont la limite classique est en accord avec la théorie classique. La quantification n'implique pas nécessairement la discrétion de tous les observables, comme dans le cas des opérateurs de position et de la quantité de mouvement. Par conséquent, la quantification de la RG n'implique pas de discrétion d'espace.

Selon Kiefer[610], les théories de la gravité quantique peuvent être regroupées en théories primaires et secondaires. Les premiers utilisent des procédures de quantification standard (canoniques ou covariantes) comme dans le cas de l'électrodynamique quantique. Le second inclut GC comme limite d'un cadre théorique quantique fondamental, par ex. théorie des cordes. Il convient de noter que cette classification est basée sur la façon dont les approches sont menées. D'un point de vue systémique, cependant, ces approches peuvent être corrélées. [611]

On espère que la gravité quantique résoudra le caractère incomplet de la physique actuelle liée au problème de GC, ayant comme motivations des considérations cosmologiques, l'évolution des trous noirs, les problèmes théoriques dans la théorie quantique des champs (TCC) et l'unification[612] [613]. Mais il n'y a aucun besoin empirique de construire la théorie. Les deux théories (la theorie quqntique et la RG) sont en parfait accord avec toutes les données disponibles. L'échelle (ou longueur) d'énergie typique dans laquelle les effets gravitationnels quantiques deviennent pertinents est d'environ 16 ordres de grandeur plus grande que celle actuelle[614]. Donc, de façon pragmatique, nous ne pouvons pas vraiment espérer de données expérimentales directes. [615]

En gravité quantique, la dimension de la longueur de Planck est si petite qu'elle suggère que les aspects de la réalité qui nécessitent une théorie de la gravité quantique pour les décrire ne devraient pas être appelés, par exemple, « aspect », « phénomène » ou « empirique ». Les kantiens affirment que « l'émergence » n'est pas seulement ce qui est pratiquement accessible, mais tout ce qui se trouve dans l'espace fait partie de la réalité empirique. Mais J. Butterfield considère qu'il est inacceptable que ces échelles de longueur, d'énergie, etc., étant si petites, existent vraiment « en

---

[609] Christian Wuthrich, « To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity », Published Article or Volume, Philosophy of Science, 2005, 777–788, http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946.

[610] C. Kiefer, « Quantum gravity: general introduction and recent developments », *Annalen der Physik* 518 (1 janvier 2006): 15(12), 129148, https://doi.org/10.1002/andp.200510175.

[611] Steven Weinberg, « What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is? », *arXiv:hep-th/9702027*, 3 février 1997, 241–251, http://arxiv.org/abs/hep-th/9702027.

[612] Wuthrich, « To quantize or not to quantize », 777–788.

[613] Kiefer, « Quantum gravity », 15(12), 129148.

[614] Nima Arkani-Hamed, « The Future of Fundamental Physics », 2012, 141(3), 53–66.

[615] Kian Salimkhani, « Quantum Gravity: A Dogma of Unification? », in *Philosophy of Science. European Studies in Philosophy of Science, vol 9.*, éd. par Alexander Christian et al. (Cham: Springer, 2018), 23–41.

principe »[616]. Il déclare que ces éléments ou leurs aspects localisés ne sont pas empiriques, bien que nous pourrions encore les appeler « physiques » et « réels ». Si cela est accepté, les différentes affirmations kantiennes selon lesquelles l'espace et le temps peuvent avoir certaines caractéristiques - par exemple, la continuité - *à priori* aux allégations de ces programmes de gravité quantique qui nient l'espace et le temps doivent être réconciliées. « La contradiction apparente serait un artefact d'une ambiguïté dans « l'espace et le temps »: les programmes de gravité quantique ne concerneraient pas l'espace et le temps au sens kantien. »[617]

L'interprétation de Copenhague peut être comprise non seulement comme une interprétation statistique minimale du formalisme quantique pour la fréquence des résultats de mesure, mais aussi comme mettant l'accent sur un domaine classique du système quantique, avec une séparation ferme de celui-ci et une description quantique de la première interprétation. Si le domaine classique comprend l'espace et le temps classiques, en termes de « gravité quantique », on nous tromperons en appliquant la théorie quantique à quelque chose qui est lié au contexte classique de cette théorie. Pour construire une « théorie quantique de l'espace et du temps », un changement radical d'interprétation, peut-être du formalisme mathématique, et de la théorie quantique elle-même, est nécessaire. [618]

Une vision instrumentiste spécifique à la théorie quantique devrait soit nier que l'état quantique décrit des systèmes individuels, au moins entre les mesures (de même, soyez prudent dans la description quantique de ces systèmes), soit postuler un domaine « non quantique » dont la description il peut être pris à la lettre (pas instrumentiste comme dans la première condition), le domaine respectif étant postulé comme « domaine classique » entendu comme macroscopique et/ou le domaine des « mesures » et/ou décrit par la physique classique[619]. Mais les applications récentes de la théorie quantique rendent ces conditions difficiles à remplir. Il s'ensuit que nous devons rechercher une interprétation dans laquelle aucun rôle fondamental n'est attribué à la « mesure », entendue comme une opération hors du domaine du formalisme.

Si l'interprétation instrumentiste de la théorie quantique est « aussi proche que possible » du formalisme quantique (« littéralisme »), on peut rejeter l'utilisation d'idées telles que la mesure, le « domaine classique » ou « l'observateur externe » auquel une description quantique-théorique est refusée, on recherche plutôt une interprétation du formalisme.

La question se pose maintenant de savoir si les déclarations théoriques peuvent aborder n'importe quel sujet au-delà des données d'observation. Les anti-réalistes scientifiques nient cette possibilité, contrairement aux réalistes scientifiques. Le réaliste scientifique donne à l'électron et au quark le même état ontologique que les chaises et les tables. L'antiréaliste considère les concepts d'objets invisibles comme de simples outils techniques pour décrire et prédire des phénomènes visibles, utiles mais sans valeur de vérité. L'instrumentiste nie également la possibilité des véritables déclarations sur des objets théoriques invisibles. Bas van Fraassen considère une manière moins

---

[616] Butterfield et Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity ».

[617] Butterfield et Isham.

[618] Butterfield et Isham.

[619] Butterfield et Isham.

radicale de rejeter le réalisme scientifique. Son empirisme constructif estime que les déclarations sur les objets théoriques peuvent en principe avoir une valeur de vérité, mais il est impossible de rassembler des preuves suffisantes pour la vérité d'une déclaration particulière. Richard Dawid déclare qu'en évitant la qualité ontologique de la revendication instrumentiste, l'empirisme constructif reste à un niveau épistémologique. [620]

En raison de la multitude des données empiriques, les scientifiques doivent construire des structures théoriques pour aider à manipuler et analyser ces données. Il peut exister plusieurs ensembles de ces structures théoriques qui se font concurrence et se remplacent au fil du temps. Même les éléments essentiels des théories scientifiques ne sont pas déterminés de manière unique par des données empiriques (principe de sous-détermination des théories scientifiques par des données expérimentales). Il n'y a donc pas de déclarations scientifiques qui doivent être considérées comme incontestables (méta-induction pessimiste). Les théories scientifiques semblent trop sous-déterminées pour s'inscrire dans un schéma réaliste, mais elles ne sont pas suffisamment sous-déterminées pour permettre l'empirisme, ce dilemme étant difficile à éviter. [621]

Une généralisation de l'hypothèse de sous-détermination adoptée par Quine soutient qu'aucune description théorique idéale hypothétique, qui couvrirait systématiquement toutes les données expérimentales possibles, ne serait pas unique. Il admet l'existence de théories aux conséquences phénoménologiques identiques, mais toujours « logiquement incompatibles » en raison de leurs ensembles d'objets ontologiques incompatibles. Qui est ainsi contraint de distinguer les différentes théories par des moyens purement conceptuels et sur une base ontologique.

Richard Dawid estime que l'instrumentalisme est le plus plausible dans le contexte d'une théorie sous-développée, car l'ascension de la théorie peut ouvrir « de nouvelles frontières du visible dont l'identification avec les frontières de l'existence semble moins plausible que dans le cas classique », et parce que « une fois le déséquilibre entre l'effort théoriquement et la conséquence observationnelle étant devenue trop grande, il devient assez problématique de supposer que les motivations saines de l'activité du physicien théorique sont exclusivement dans le régime visible. »[622] Sa conclusion est que les physiciens travaillant sur la théorie des cordes ne sont pas intéressés par des expériences pour prédire des phénomènes visibles. Leur théorie n'est pas encore capable d'une telle chose. Mais l'observation est une condition préalable pour attribuer le sens des concepts et de la théorie des cordes. Une motivation pour d'éventuelles conséquences visibles futures ne semble pas convaincante.

Steven Weinstein considère la GC comme une « théorie physique qui décrit les interactions gravitationnelles de la matière et de l'énergie dans lesquelles la matière et l'énergie sont également décrites par la théorie quantique »[623]. De nombreuses théories de la gravité quantique sont des quantifications de la gravité mais, comme le soulignent Callender et Huggett, il s'agit d'un choix

---

[620] Richard Dawid, « Scientific Realism in the Age of String Theory », *Physics and Philosophy*, 2007.

[621] Dawid.

[622] Dawid.

[623] Weinstein et Rickles, « Quantum Gravity ».

empirique plutôt que logique[624]. Enfin, une quantification de la gravité par la RG suggère davantage, en particulier ceux du camp de la gravité quantique canonique (GCC), qu'une certaine méthode de quantification est nécessaire pour l'espace.

L'une des premières tentatives de réconciliation du quantique avec la gravité est apparue dans les années 1960 et est connue sous le nom de théorie semi-classique. Bien que la théorie semi-classique ait rapidement été considérée comme défectueuse, elle a été considérée comme un excellent appareil heuristique pour résoudre le problème de la gravité quantique. Cette théorie, ainsi que d'autres dilemmes, tels que le débat sur la quantification, a conduit à la nécessité de théories plus robustes sur la gravité quantique.

Contrairement à d'autres théories modernes de la physique, où un consensus a été atteint en théorie, la gravité quantique a un certain nombre de programmes de recherche alternatifs qui développent une hypothèse de base à travers les hypothèses auxiliaires. Trois des programmes de recherche sur la gravité quantique les plus populaires de sa courte histoire incluent la théorie semi-classique, la théorie des cordes et la gravité quantique canonique. Mais jusqu'à présent, aucun n'a de support expérimental. Certaines expériences ont été réalisées, mais toutes étaient négatives. Les expériences ont été développées de telle manière que la théorie ne prédit que ce qui pourrait se produire selon un certain scénario spécifique, qui n'est pas le seul possible, donc elles ne sont pas potentiellement réfutables.

Étant donné le manque de progrès empiriques, une stratégie pluraliste pour le développement théorique est recommandée dans toutes les approches de gravité quantique. Dans la théorie des cordes, il existe différentes formulations théoriques, ou dualités physiquement équivalentes, ce qui est pertinent pour le problème de la sous-détermination des théories par les données. On soutient qu'une perspective plus empirique sur la sémantique des théories devrait être adoptée, afin de comprendre ce que les théories de l'espace et du temps nous disent.

En théorie des cordes, contrairement à d'autres approches, il existe une véritable unification de différentes forces, pas seulement une description quantique de la gravité, mais certains scientifiques critiquent cette théorie pour l'utilisation de trop de ressources au détriment d'autres approches de la gravité quantique.

Les expériences de pensée peuvent être importantes à des fins heuristiques, mais dans le cas de la gravité quantique, les conclusions basées sur des expériences de pensée ne sont pas très fiables. L'absence des résultats empiriques a conduit certains scientifiques et philosophes à affirmer que ces théories ne sont pas vraiment scientifiques.

Simonluca Pinna et Simone Pinna proposent un « test conceptuel » pour évaluer si le contenu mathématique de la théorie de la gravité quantique fait référence à un éventuel modèle empirique

---

[624] Craig Callender et Nick Huggett, *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity* (Cambridge University Press, 2001).

vérifiable[625]. Les meilleures observations empiriques sont celles astrophysiques pour la gravité forte, il y a donc deux options: (1) le développement de nouveaux cadres expérimentaux appropriés[626], et (2) la possibilité de remplacer les critères de vérification scientifique standard par les critères les moins empiriquement réglementés[627]. Il y a deux opinions de scientifiques: ceux qui considèrent que l'espace-temps n'est pas une structure physique fondamentale[628], et ceux qui le considèrent comme fondamental dans n'importe quel domaine physique[629] qui présupposent l'approche conservatrice épistémologique exprimée par (1). Ceux qui soutiennent la disparition de l'espace-temps semblent suivre la perspective (2).

Certains méthodologistes affirment que la thèse de la disparition de l'espace-temps aux hautes énergies nécessite un changement des critères de vérification scientifique, afin d'adapter la cohérence empirique à ces thèses en gravité quantique. Cela impliquerait des changements dans les concepts d '« observateur » et leur lien avec les observations et les mesures.

La géométrodynamique[630] a été la première tentative de quantifier la gravité à partir de la formulation canonique (hamiltonienne) de la théorie générale de la relativité interprétée comme une théorie indépendante du fond[631]. Par la suite, les adeptes de la gravité quantique à boucles (GCB), une approche canonique, affirment que l'espace relativiste disparaît à la limite des hautes énergies. Cela pourrait impliquer l'absence d'un cadre spatio-temporel[632]. Il y a des soupçons sur la disparition de l'espace-temps et d'autres approches[633], y compris la théorie des cordes qui est généralement interprétée comme dépendante du fond.

---

[625] S. Pinna et Simone Pinna, « A Conceptual Test for Cognitively Coherent Quantum Gravity Models », 2017, https://doi.org/10.3390/technologies5030051.

[626] Sabine Hossenfelder et Lee Smolin, « Phenomenological Quantum Gravity », *arXiv:0911.2761 [gr-qc, physics:physics]*, 14 novembre 2009, 66, 99–102, http://arxiv.org/abs/0911.2761.

[627] Richard Dawid, *String Theory and the Scientific Method*, 1 edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2013).

[628] Carlo Rovelli, « Quantum Gravity », Cambridge Core, novembre 2004, https://doi.org/10.1017/CBO9780511755804.

[629] Amit Hagar et Meir Hemmo, « The Primacy of Geometry », ResearchGate, 2013, 44, 357–364, https://www.researchgate.net/publication/259158226_The_primacy_of_geometry.

[630] Karel Kuchar, « Canonical Quantum Gravity », *arXiv:gr-qc/9304012*, 8 avril 1993, 119–150, http://arxiv.org/abs/gr-qc/9304012.

[631] C. Kiefer, « Time in Quantum Gravity », in *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, éd. par Craig Callender (Oxford University Press, 2011), 663–678.

[632] Carlo Rovelli, « The Disappearance of Space and Time », in *The Disappearance of Space and Time*, éd. par Dennis Dieks (Elsevier, 2007), 25–36.

[633] Nick Huggett, Tiziana Vistarini, et Christian Wuthrich, « Time in quantum gravity », *arXiv:1207.1635 [gr-qc, physics:physics]*, 3 juillet 2012, 242–261, http://arxiv.org/abs/1207.1635.

Hagar et Hemmo déclarent la nécessité d'un certain type d'espace-temps même au niveau du GC; la physique consiste non seulement en théories dynamiques, mais aussi en expériences et mesures par lesquelles les modèles doivent être testés. Donc, il doit y avoir quelque chose d'observable avec des caractéristiques géométriques ou qui peut être traduit en termes géométriques[634]. Ils affirment que l'interprétation des théories de GC comme théories sans espace contredirait la base épistémique de la physique expérimentale, respectivement avec la primauté des observations et des mesures géométriques.

Les partisans de la disparition de l'espace-temps suivent une approche leibnizienne, selon Earman, voire pythagoricienne, de la réalité, selon laquelle le sens de la réalité physique peut être directement dérivé de la théorie mathématique en utilisant des critères *a priori* plus « raisonnables »[635]. La perspective opérationnaliste définit la réalité physique par rapport à sa mesurabilité, respectivement tout concept n'est « rien de plus qu'un ensemble d'opérations, le concept est synonyme de l'ensemble approprié d'opérations »[636]. La détection de quantités mesurables en gravité quantique est l'objectif principal des expérimentateurs, car la mesurabilité est une caractéristique essentielle pour identifier les quantités physiquement pertinentes.

Il n'a pas encore été possible d'inclure la gravité dans le cadre théorique du champ quantique du modèle standard, car les interactions gravitationnelles ne répondent pas aux principes de renormalisation.

3.1 L'heuristique de la gravité quantique

Dans le but de développer une solide théorie de la gravité quantique, il y a eu plusieurs programmes de recherche, dont certains sont tombés hors du temps en raison de la puissance heuristique plus élevée d'autres programmes. J. Butterfield distingue ainsi trois grands programmes de recherche : [637]

Le programme de particules établit comme entité de base le graviton, la quantité du champ gravitationnel. Graviton se propage dans un espace-temps de Minkowski et est associé à une représentation spécifique du groupe Poincaré à travers une masse nulle et un spin 0 ou 2. Mais ce programme présente de nombreux dysfonctionnements conceptuels.
Le programme des supercordes, une approche motivée par le succès de la transition de l'ancienne théorie non renormalisable des interactions faibles à la nouvelle unification renormalisable des forces faibles et électromagnétiques trouvée par Salam, Glashow et Weinberg. L'idée était d'ajouter des champs de matière de la relativité générale pour éliminer le problème d'UV. Ainsi est apparue

[634] Hagar et Hemmo, « The Primacy of Geometry », 44, 357–364.

[635] John Earman, « Thoroughly Modern Mctaggart: Or, What Mctaggart Would Have Said If He Had Read the General Theory of Relativity », *Philosophers' Imprint* 2 (2002): 2, 1–28.

[636] Richard Feldman, « Naturalized Epistemology », 5 juillet 2001, 5, https://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/epistemology-naturalized/.

[637] Butterfield et Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity ».

la théorie de la supergravité qui, après quelques succès mineurs, est arrivée à la conclusion qu'elle ne résout pas les divergences, mais sa ligne de pensée est actuellement poursuivie par la théorie des supercordes, qui est le programme de recherche dominant en gravité quantique. Le programme n'est pas encore arrivé à maturité. Du point de vue de la réponse offerte aux aspects conceptuels, le programme des supercordes est similaire à bien des égards au programme des particules.

Le programme de gravité quantique canonique a commencé avec la théorie Wheeler-DeWitt. Plus tard est venu le programme d'Ashtekar qui utilise l'équation Wheeler-DeWitt[638], à l'aide d'un ensemble de variables canoniques qui produisent une simplification de la structure des fonctions de contrainte centrales, et est toujours un programme très actif, avec des développements impressionnants ces dernières années.

Les trois programmes sont similaires dans le sens où leur principal moyen d'aller au-delà du traitement commun de l'espace-temps est de quantifier une quantité qui est un type standard de variable en physique classique.

Il existe trois problèmes majeurs dans la conception d'une théorie de la gravité quantique: la théorie quantique et la relativité générale présentent en elles-mêmes des problèmes conceptuels importants, les bases fondamentales disparates des deux théories génèrent de nouveaux problèmes majeurs en essayant de les combiner, et le contraste entre l'absence d'une théorie de la gravité quantique satisfaisante et des théories des ingrédients réussis soulèvent des questions sur la nature et la fonction de la discussion philosophique de la gravité quantique.

Selon Laudan, la théorie préférée est celle qui maximise les succès empiriques, tout en réduisant les passifs conceptuels, et la tradition de recherche préférée est celle qui soutient les théories les plus réussies.

Selon Péter Szegedi, l'histoire des interprétations de la mécanique quantique correspond très bien à la méthodologie de Lakatos de programmes de recherche scientifique rivaux, par rapport à celle de Kuhn qui ne permet pas l'existence simultanée de différents paradigmes rivaux.[639] [640] Il s'ensuit que le développement de la mécanique quantique lui-même est un développement, une évolution de problèmes progressifs, s'il est progressif à la fois théoriquement et empiriquement. Les interprétations de la mécanique quantique peuvent être organisées comme une série de théories,

---

[638] Bryce S. DeWitt, « Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory », *Physical Review* 160, nº 5 (25 août 1967): 160 (5): 1113–1148, https://doi.org/10.1103/PhysRev.160.1113.

[639] Péter Szegedi, « Lakatos On Crucial Experiments And The History Of Interpretations Of Quantum Mechanics », in *Appraising Lakatos: Mathematics, Methodology and the Man*, éd. par G. Kampis, L. : Kvasz, et M. Stöltzner (Kluwer Academic Publishers, 2002), 1–101.

[640] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 33-34.

entraînant une progressivité théorique, mais la progressivité empirique est difficile à évaluer. Ainsi, selon les critères, les programmes d'interprétation peuvent être scientifiques, mais ils sont dégénératifs, respectivement ils se caractérisent par une stagnation. L'évaluation peut changer à l'avenir, étant un programme à long terme : « De plus, il arrive parfois que, lorsqu'un programme de recherche atteint une phase dégénérative, une petite révolution ou un changement créatif dans son heuristique positif peut la repousser. » [641]

Il est possible qu'un programme dégénéré soit relancé, ou même considéré comme réussi s'il fournit des résultats utiles pour d'autres programmes. [642]

Péter Szegedi distingue, dans le cas de diverses interprétations quantiques, un noyau dur et une adaptation heuristique aux problèmes qui se sont posés[643]. Ainsi dans le programme de Louis de Broglie, la synthèse des images onde-particule est le noyau dur, tandis que les formes réelles de réalisation dans l'ordre d'apparition (heuristique positive) sont les suivantes : le principe de la double solution, la théorie des ondes pilotes, l'hypothèse de non-linéarité et la thermodynamique cachée. Dans le cas de David Bohm, le noyau dur est la théorie des variables cachées et du potentiel quantique, à laquelle à un moment il a ajouté l'hypothèse de la stochasticité. Vigier a utilisé le même noyau dur, mais avec une hypothèse supplémentaire sur l'hypothèse des degrés de liberté cachés. Il existe d'autres programmes dans les interprétations de la mécanique quantique. Dans le programme de recherche Fényes-Nelson-de Peňa, la stochasticité n'est pas une hypothèse supplémentaire, mais un noyau dur, où l'heuristique positive a forcé l'utilisation initiale des processus de diffusion, puis le mouvement brownien et, enfin, l'électrodynamique stochastique. Les heuristiques positives de ces programmes sont différentes, mais elles sont généralement utilisées par l'approche relativiste, le principe du déterminisme ou de la causalité et le principe de l'unité de la nature. Dans l'interprétation orthodoxe, selon Cushing, le noyau dur se compose de relations de commutation canoniques et équations hamiltoniennes de mouvement, et l'heuristique positive s'applique aux formes classiques des hamiltoniens pour des systèmes spécifiques, au principe de correspondance et au principe des observables ; comme hypothèse auxiliaire, le rapport opérateur-observateur a été utilisé. Lakatos dit à propos de ce programme :

> « Dans la nouvelle théorie quantique postérieure à 1925, la position « anarchiste » est devenue dominante et la physique quantique moderne, dans son interprétation de Copenhague, est devenue l'un des principaux porte-étendards de l'obscurantisme philosophique. Dans la nouvelle théorie, le principe de la « complémentarité » a incorporé l'incohérence. [faible] en tant que caractéristique fondamentale de la nature et a combiné le positivisme subjectiviste et la philosophie dialectique

[641] Lakatos, 51.

[642] H. Zandvoort, Paul Weingartner, et Methology and Philosophy of Science International Congress of Logic, *Intrinsic Success and Extrinsic Success of Research Programs, in 7th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science: Salzburg, July 11th-16th, 1983 Vol. 4, Vol. 4,* (Salzburg: Huttegger, 1983), 289-92.

[643] Szegedi, « Lakatos On Crucial Experiments And The History Of Interpretations Of Quantum Mechanics ».

> antilogique et même le langage ordinaire en une seule alliance malsaine. Après 1925, Bohr et ses associés ont introduit un déclin nouveau et sans précédent des normes critiques pour les théories scientifiques, ce qui a conduit à une défaite de la raison dans la physique moderne et à un culte anarchiste d'un chaos incompréhensible. »[644]

Les expériences cruciales en mécanique quantique commencent, pour Lakatos, par une expérience gedanken, l'expérience Einstein-Podolsky-Rosen[645]. Les commentateurs distinguent (au moins) cinq hypothèses ici: le principe de réalisme, la validité du formalisme de la mécanique quantique, l'hypothèse de complétude, le principe de séparabilité et la validité de la logique classique. Selon l'argument EPR, l'une des cinq hypothèses est fausse. La prochaine étape a été prise par Bohm, qui a reformulé l'expérience gedanken avec des spins[646], mais sans paraître une autre expérience cruciale car il n'a pas été déclaré que différentes théories offrent des résultats de mesure différents.

Le travail de John Bell a donné l'espoir que des tests expérimentaux d'interprétations sont possibles[647], soulignant qu'il doit y avoir des différences entre les prédictions mécaniques quantiques et cachées. Il a supposé que dans une expérience réelle, nous pouvions mesurer les probabilités. L'inégalité de Bell était encore plus proche des conditions réelles d'une expérience facile à gérer.

3.2 Tests de la gravité quantique

Le test primordial de toute théorie quantique de la gravité est la reproduction des succès de la relativité générale. Cela implique de reconstruire la géométrie locale à partir des observables non locaux. De plus, la gravité quantique devrait probablement prédire la topologie à grande échelle de l'Univers, qui pourrait bientôt être mesurable[648], et les phénomènes à l'échelle de Planck. [649]

Il existe déjà une prédiction liée à la gravité quantique: l'existence et le spectre du rayonnement Hawking du trou noir, une prédiction « semi-classique » résultant de la théorie des champs

---

[644] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 59-60.

[645] A. Einstein, B. Podolsky, et N. Rosen, « Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? », *Physical Review* 47, nº 10 (15 mai 1935): 770-80, https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777.

[646] Bohm, *Quantum Theory*.

[647] J. S. Bell, « On the Einstein Podolsky Rosen paradox », *Physics Physique Fizika* 1, nº 3 (1 novembre 1964): 447, https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195.

[648] Neil Cornish, David Spergel, et Glenn Starkman, « Circles in the Sky: Finding Topology with the Microwave Background Radiation », *Classical and Quantum Gravity* 15, nº 9 (1 septembre 1998): 15, 2657, https://doi.org/10.1088/0264-9381/15/9/013.

[649] Richard Easther et al., « Inflation as a Probe of Short Distance Physics », *Physical Review D* 64, nº 10 (16 octobre 2001): 103502, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.103502.

quantiques sur un fond incurvé fixe, et confirmée ensuite théoriquement[650]. On suppose qu'une théorie de la gravité qui ne reproduira pas cette prédiction est erronée.

Pour l'échelle d'énergie de Planck, plusieurs tests ont été proposés sur la base de deux idées: que l'on puisse détecter de très petites déviations de symétries exactes, et que l'on puisse intégrer sur des distances ou des temps longs pour observer de très petits effets collectifs. Ces propositions restent extrêmement spéculatives, mais elles sont plausibles[651]. Certaines de ces idées peuvent être trouvées dans Giovanni Amelino-Camelia, *Are we at the dawn of quantum-gravity phenomenology*: [652]

- Violations du principe d'équivalence[653]. Des tests de précision du principe d'équivalence pourraient être développés par interférométrie atomique et neutronique.
- Violations de l'invariance CPT, par exemple en formant des trous noirs virtuels[654]. Les limites expérimentales actuelles se rapprochent du niveau d'observation de ces effets[655]. Des violations d'autres symétries globales, telles que CP, peuvent également se produire, avec des conséquences qui peuvent être observées à l'échelle de Planck. [656]
- Distorsions des relations de dispersion de la lumière et des neutrinos sur de longues distances, entraînant une vitesse de la lumière dépendante de la fréquence[657]. Il peut être observé en observant les rayons gamma, les limites expérimentales actuelles sont proches du niveau d'observation. Si l'effet dépend de la polarisation, les tests de biréfringence induits par la gravité peuvent être dans les limites d'observation. [658]

---

[650] Fay Dowker et al., « Pair Creation of Dilaton Black Holes », *Physical Review D* 49, nº 6 (15 mars 1994): 2909, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.49.2909.

[651] Carlip, « Quantum Gravity ».

[652] Giovanni Amelino-Camelia, « Are we at the dawn of quantum-gravity phenomenology? », *arXiv:gr-qc/9910089*, 25 octobre 1999, http://arxiv.org/abs/gr-qc/9910089.

[653] G. Z. Adunas, E. Rodriguez-Milla, et D. V. Ahluwalia, « Probing Quantum Aspects of Gravity », *Physics Letters B* 485, nº 1-3 (juillet 2000): 215, https://doi.org/10.1016/S0370-2693(00)00697-3.

[654] Alan Kostelecky et Rob Potting, « Expectation Values, Lorentz Invariance, and CPT in the Open Bosonic String », *Physics Letters B* 381, nº 1-3 (juillet 1996): 89, https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00589-8.

[655] R. Adler et al., « Test of CPT Symmetry and Quantum Mechanics with Experimental data from CPLEAR », *Physics Letters B* 364, nº 4 (décembre 1995): 239, https://doi.org/10.1016/0370-2693(95)01416-0.

[656] Renata Kallosh et al., « Gravity and global symmetries », *Physical Review D* 52, nº 2 (15 juillet 1995): 912, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.912.

[657] Jorge Alfaro, Hugo A. Morales-Tecotl, et Luis F. Urrutia, « Quantum gravity corrections to neutrino propagation », *Physical Review Letters* 84, nº 11 (13 mars 2000): 2318, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2318.

[658] Reinaldo J. Gleiser et Carlos N. Kozameh, « Astrophysical limits on quantum gravity motivated birefringence », *Physical Review D* 64, nº 8 (septembre 2001): 083007, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.083007.

- Les interféromètres de détection des ondes gravitationnelles ont pu observer des fluctuations quantiques testables en géométrie spatiale[659], une idée encore controversée.
- La gravité quantique près de la masse de Planck affecte les flux des groupes de renormalisation et les constantes de couplage à faible énergie dans les grandes théories unifiées[660], mais cet effet est plutôt un inconvénient, rendant d'autres tests possibles plus difficiles.
- Utilisation de lasers puissants pour l'observation (indirecte) du rayonnement Unruh, l'équivalent du rayonnement Hawking pour une particule accélératrice[661]. Cela peut être au moins un test de prédictions théoriques de champ quantique à partir de la gravité quantique.
- Un test indirect à partir d'analogues de la matière condensée avec des trous noirs, qui devraient émettre des phonons par « rayonnement Hawking » provenant d'horizons soniques[662]. Des tests pourraient être possibles à l'avenir dans les condensats de Bose-Einstein[663], l'hélium superfluide 3[664] et la « lumière lente » dans les diélectriques. [665]

Ces expériences ne feront pas de distinction entre des modèles spécifiques de gravité quantique, car les modèles actuels ne peuvent pas encore faire de prévisions suffisamment claires, mais les phénomènes peuvent être testés à l'échelle de Planck affectée par la gravité quantique. Dernièrement, les physiciens se sont concentrés sur l'idée de tests expérimentaux pour une certaine classe de modèles de gravité quantique, la « gravité à l'échelle TeV » ou le « monde des membranes »[666], qui postulent des « grandes » dimensions supplémentaires d'un millimètre.

---

[659] Y. Jack Ng et H. van Dam, « Measuring the foaminess of space-time with gravity-wave interferometers », *Foundations of Physics* 30, nº 5 (2000): 795, https://doi.org/10.1023/A:1003745212871.

[660] L. J. Hall et U. Sarid, « Gravitational Smearing of Minimal Supersymmetric Unification Predictions », *Physical Review Letters* 70, nº 18 (3 mai 1993): 2673, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.2673.

[661] Pisin Chen et Toshi Tajima, « Testing Unruh Radiation with Ultraintense Lasers », *Physical Review Letters* 83, nº 2 (12 juillet 1999): 256, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.256.

[662] Matt Visser, « Acoustic black holes », *arXiv:gr-qc/9901047*, 15 janvier 1999, http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901047.

[663] L. J. Garay et al., « Sonic analog of gravitational black holes in Bose-Einstein condensates », *Physical Review Letters* 85, nº 22 (27 novembre 2000): 4643, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.4643.

[664] G. E. Volovik, « Field theory in superfluid 3He: What are the lessons for particle physics, gravity and high-temperature superconductivity? », *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96, nº 11 (25 mai 1999): 6042, https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.6042.

[665] U. Leonhardt et P. Piwnicki, « Relativistic Effects of Light in Moving Media with Extremely Low Group Velocity », *Physical Review Letters* 84, nº 5 (31 janvier 2000): 822, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.822.

[666] Lisa Randall et Raman Sundrum, « A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension », *Physical Review Letters* 83, nº 17 (25 octobre 1999): 3370, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.3370.

Le problème de la façon dont la mesure affecte l'état ontologique du système observé est appelé le problème de mesure. La mesure en mécanique quantique est vue de différentes manières dans diverses interprétations. En mécanique classique, un système de points simple est entièrement décrit par la position et la quantité de mouvement de la particule. En mécanique quantique, un système est décrit par son état quantique, par les probabilités des positions et quantités de mouvement possibles. Les valeurs prédites des mesures sont décrites par une distribution de probabilité ou une « moyenne » (ou « attente ») de l'opérateur de mesure sur la base de l'état quantique du système préparé. Le processus de mesure est souvent considéré comme aléatoire et indéterministe dans certaines interprétations, tandis que dans d'autres interprétations, l'indéterminisme est fondamental et irréductible.

Il existe plusieurs façons possibles de décrire mathématiquement le processus de mesure (à la fois la distribution de probabilité et la fonction d'onde effondrée). La description la plus pratique dépend du spectre (c'est-à-dire l'ensemble des valeurs propres) de l'observable

La caractéristique la plus évidente de la gravité quantique est le manque de données (aucun phénomène ne peut être identifié sans équivoque à la suite d'une interaction entre la relativité générale et la théorie quantique). En effet, l'échelle de la gravité quantique (longueur de Planck) est extrêmement petite, tout comme l'énergie de Planck et le temps de Planck. Il s'avère que le seul régime physique dans lequel les effets de la gravité quantique pourraient être étudiés directement se situe dans l'ère post-Big Bang immédiate, en plus des problèmes liés à l'interaction des gravitons spin-2 avec un tenseur d'énergie-quantité de mouvement conservé. Il s'ensuit que différentes théories de la gravité quantique ne peuvent pas être vérifiées empiriquement qu'à de très hautes énergies.

Pour la physique, cela signifie qu'il est très difficile de construire une théorie pleinement satisfaisante. D'un point de vue philosophique, la difficulté est due aux problèmes conceptuels de l'espace, du temps et de la matière, mais aussi à la construction théorique, car il n'y a pas d'accord sur les types de données qu'une théorie quantique de la gravité obtiendrait. Dans cette situation, J. Butterfield déclare que la construction théorique devient beaucoup plus fortement influencée par des considérations théoriques, basées sur les différentes opinions de première partie sur ce à quoi la théorie devrait ressembler, basées en partie sur les préjugés philosophiques du chercheur et sur les techniques mathématiques considérées. de réussite. Ainsi, un programme de recherche tend à construire des schémas théoriques abstraits compatibles avec un cadre conceptuel préconçu et cohérents interne au sens mathématique, aboutissant à une « sous-détermination de la théorie des données ». De plus, le programme a la tendance à produire des schémas basés sur un large éventail de motivations philosophiques, qui pourraient être présumées être des projections inconscientes du psychique du chercheur individuel, et pourraient être rejetés en tant que tels.

Il est important de déterminer s'il existe des effets de gravité quantique qui peuvent être mesurés en dessous des limites de Planck, pouvant résulter d'un effet non perturbateur. Mais l'existence

même de tels effets et les phénomènes que les prédisent sont eux-mêmes probablement fortement dépendants de la théorie. Il s'ensuit que le sujet de la gravité quantique présente au philosophe une gamme large et variée d'approches, à condition que dans la gravité quantique il n'y ait pas de théories suffisamment bien définies, pas même bien établies.

D'après les analyses dimensionnelles, il semblerait que la gravité quantique nécessite des énergies expérimentalement élevées, à partir du niveau d'énergie de Planck. Cela nécessiterait un accélérateur de particules plus grand que notre galaxie, et les tests directs de gravité quantique semblent donc impossibles selon ces calculs. Il s'avère que des tests de laboratoire de haute précision dans le champ faible seront la seule possibilité de faire de la gravité quantique une théorie physique testable/falsifiable. Cela serait possible dans des systèmes macroscopiques qui adhèrent toujours aux lois de la théorie quantique - celles décrites par les fonctions d'onde macroscopiques. Celles-ci permettraient, par exemple, la mesure des énergies d'excitation gravitationnelle quantique[667]. Johan Hansson et Stéphane François suggèrent la possibilité de tester les théories de la gravité quantique en utilisant des systèmes quantiques macroscopiques; hélium superfluide, condensats de gaz de Bose-Einstein et molécules « macroscopiques » encore soumises à la mécanique quantique, et étoiles à neutrons. Les effets de la gravité quantique, définis ici comme des interactions gravitationnelles observables entre des objets quantiques, devraient être observés en utilisant la technologie existante, permettant une falsifiabilité à faible énergie dans le régime de champ faible. [668]

Roberto Balbinot et Alessandro Fabbri, dans *Amplifying the Hawking Signal in BECs*[669], proposent des modèles simples de condensats de Bose-Einstein pour étudier les effets analogiques de la création de paires, à savoir l'effet Hawking des trous noirs acoustiques et l'effet dynamique Casimir. L'idée est de reproduire dans un contexte d'effets quantiques de matière condensée prédits par la théorie des champs quantiques dans l'espace courbe, y compris l'émission thermique des trous noirs prédite par Hawking en 1974[670]. Les auteurs de cette expérience concluent qu'ils ont obtenu des résultats qui pourraient être utile dans les futures recherches expérimentales.

Le *formalisme THe* est basé sur la forme lagrangienne qui régule la dynamique des particules ponctuelles de masse et de charge et le champ électromagnétique dans un champ gravitationnel

---

[667] Johan Hansson, « Aspects of nonrelativistic quantum gravity », *arXiv:0910.4289 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph, physics:quant-ph]*, 22 octobre 2009, 707 (2009), http://arxiv.org/abs/0910.4289.

[668] Johan Hansson et Stephane Francois, « Testing Quantum Gravity », *International Journal of Modern Physics D* 26, nº 12 (octobre 2017): 1743003, https://doi.org/10.1142/S0218271817430039.

[669] Roberto Balbinot et Alessandro Fabbri, « Amplifying the Hawking signal in BECs », *Advances in High Energy Physics* 2014 (2014): 1-8, https://doi.org/10.1155/2014/713574.

[670] S. W. Hawking, « Particle Creation by Black Holes », *Communications in Mathematical Physics* 43, nº 3 (1 août 1975): 199-220, https://doi.org/10.1007/BF02345020.

statique, sphérique symétrique, décrit par les potentiels gravitationnels phénoménologiques T, H, e. Cette théorie a été utilisée pour interpréter les résultats des tests expérimentaux du principe d'équivalence fort. [671]

Le *formalisme xg* introduit par W.-T. Ni[672] a initialement fourni un cadre pour l'analyse de la physique électrodynamique dans un champ de fond gravitationnel, puis s'est étendu pour couvrir d'autres secteurs du modèle standard.

Le *formalisme de Kostelecky*, développé par Colladay et Kostelecky, est utilisé pour traiter la possibilité de rupture spontanée de la symétrie de Lorentz dans le contexte de la théorie des cordes. [673]

Un formalisme basé sur les formes des équations du mouvement a l'avantage de répondre directement à certaines exigences naturelles.

3.3 Gravité quantique canonique

Dans l'interprétation de la gravité quantique canonique (GQC), la gravité apparaît comme une pseudoforce géométrique, elle est réduite à la géométrie espace-temps et devient un simple effet de la courbure de l'espace-temps[674]. (Maudlin[675]). Lehmkuhl[676] soutient que le formalisme canonique ne confirme pas cette interprétation. RG associe la gravité à l'espace-temps, mais le type d'association n'est pas fixé[677]. Au lieu de l'interprétation géométrique, on peut utiliser l'interprétation de champ (la géométrie espace-temps est réduite à un champ gravitationnel, respectivement la métrique, considérée comme « juste un autre champ ») ou l'interprétation égalitaire (une identification conceptuelle de la gravité et de l'espace-temps en RG[678]). Ces

---

[671] J. E. Horvath et al., « Einstein equivalence principle and theories of gravitation: A gravitationally modified standard model », *Physical Review D* 38, nº 6 (15 septembre 1988): 1754, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.38.1754.

[672] W.-T. Ni, « Equivalence principles and electromagnetism », *Physical Review Letters* 38 (1 février 1977): 301, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.301.

[673] Don Colladay et Alan Kostelecky, « Lorentz-Violating Extension of the Standard Model », *Physical Review D* 58, nº 11 (26 octobre 1998): 6760, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.58.116002.

[674] Salimkhani, « Quantum Gravity ».

[675] Tim Maudlin, « On the Unification of Physics », *Journal of Philosophy* 93, nº 3 (1996): 129–144.

[676] D. Lehmkuhl, D. Dieks, et M. Redei, « Is spacetime a gravitational field?, in The Ontology of Spacetime II, Volume 4 - 1st Edition », 2008, 83–110, https://www.elsevier.com/books/the-ontology-of-spacetime-ii/dieks/978-0-444-53275-6.

[677] Lehmkuhl, Dieks, et Redei, 84.

[678] Lehmkuhl, Dieks, et Redei, 84.

interprétations alternatives réduisent les différences conceptuelles entre la RG et d'autres théories de champ.

L'instrumentalisme permet d'ignorer la gravité quantique, car il ne conçoit les théories scientifiques que comme des outils prédictifs. La gravité quantique canonique suit une théorie quantique non perturbative du champ gravitationnel. Il est basé sur la cohérence entre la mécanique quantique et la gravité, sans chercher à unifier tous les champs. L'idée principale est d'appliquer des procédures de quantification standard à la théorie générale de la relativité. Pour cela, il est nécessaire que la relativité générale soit exprimée sous forme canonique (hamiltonienne) puis quantifiée comme d'habitude. Cela a été (partiellement) réussi par Dirac[679] et (différemment) par Arnowitt, Deser et Misner. [680]

3.3.1 Tests proposés pour le GCC

Carlip déclare, en référence à la gravité quantique : « La mesure suprême de toute théorie est son accord avec la Nature ; si nous n'avons pas de tels tests, comment saurons-nous si nous avons raison ? » [681] Habituellement, une nouvelle théorie est construite en utilisant les données expérimentales disponibles, qui tente de faire correspondre les modèles phénoménologiques, puis de vérifier par des prédictions. Souvent, la cohérence conceptuelle et formelle est contournée pour tenter de correspondre à la réalité. En gravité quantique, tout se passe très différemment : il est presque entièrement basé sur la cohérence conceptuelle et formelle, ainsi que sur les contraintes imposées, et semble impossible à aborder par la recherche expérimentale. Dean Rickles déclare que le test de base de toute théorie scientifique est un test expérimental, sans lequel la théorie s'emmêle dans les mathématiques pures ou, pire, la métaphysique. [682]

Giovanni Amelino-Camelia a lancé un nouveau programme de recherche appelé « phénoménologie gravitationnelle quantique », dans lequel elle essaie de transformer la recherche sur la gravitation quantique en une véritable discipline expérimentale. L'échelle à laquelle les effets gravitationnels quantiques se produisent est déterminée par les différentes constantes physiques de la physique fondamentale : h, c et G, qui caractérisent les phénomènes quantiques, relativistes et gravitationnels. En combinant ces constantes, nous obtenons les constantes de Planck auxquelles les effets de la gravité quantique doivent se manifester.

---

[679] Paul A. M. Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics* (Mineola, NY: Snowball Publishing, 2012).

[680] R. Arnowitt, S. Deser, et C. W. Misner, « The Dynamics of General Relativity », *General Relativity and Gravitation* 40, nº 9 (septembre 2008): 1997-2027, https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1.

[681] Carlip, « Quantum Gravity », 64: 885.

[682] Dean Rickles, « Quantum Gravity: A Primer for Philosophers. », Preprint, octobre 2008, http://philsci-archive.pitt.edu/5387/.

Ce sont avec plusieurs ordres de grandeur au-delà des capacités expérimentales actuelles. Mais l'argument de l'échelle s'applique aux événements gravitationnels quantiques individuels. L'idée est de combiner de tels événements pour amplifier les effets qui peuvent être détectés avec un équipement actuel ou proche. La gravité quantique peut également être étudiée en observant l'extrémité opposée du spectre d'échelle, les systèmes astronomiques, en observant le rayonnement cosmique, les explosions générant des rayons gamma, les explosions Kaon, les particules, la lumière et le rayonnement de fond cosmique, par le biais d'effets gravitationnels quantiques qui pourraient se manifester dans ces systèmes. Dans ces systèmes, les effets d'échelle de Planck sont naturellement amplifiés.

Nom	**Formule**	**Valeur (SI)**
Longueur Planck	$l_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1{,}616229(38)\times10^{-35}$ m
Masse Planck	$m_P = \sqrt{\hbar c/G}$	$2{,}176470(51)\times10^{-8}$ kg
Temps Planck	$t_P = l_P/c = \hbar/m_Pc^2 = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5{,}39116(13)\times10^{-44}$ s
Charge Planck	$q_P = \sqrt{4\pi\varepsilon_0\hbar c} = e/\sqrt{\alpha}$	$1{,}875\,545\,956(41)\times10^{-18}$ C
Température Planck	$T_P = m_Pc^2/k_B = \sqrt{\hbar c^5/Gk_B^2}$	$1{,}416808(33)\times10^{32}$ K

Tableau 3.1 Les constantes Planck

Mais de tels effets peuvent également être étudiés dans des dispositifs expérimentaux sur Terre, utilisant également des « expériences naturelles », telles que des particules se déplaçant sur de grandes distances à des vitesses énormes[683]. Bryce DeWitt a soutenu que les effets gravitationnels quantiques ne seront pas mesurables sur les particules élémentaires individuelles, car le champ gravitationnel lui-même n'a pas de sens à ces échelles. Le champ statique d'une telle particule ne dépasserait pas les fluctuations quantiques. [684]

Afin d'utiliser l'univers comme dispositif expérimental, l'idée est que la lumière change ses propriétés sur de longues distances dans le cas d'un espace-temps discret, ce qui produit des effets

[683] Rickles.

[684] B. S. DeWitt et Louis Witten, *The Quantization of Geometry, in Gravitation an Introduction to Current Research*, First Edition edition (John Wiley & Sons, 1962), 372.

biréfringents[685]. La base théorique est qu'une onde se propageant dans un espace-temps discret violera l'invariance de Lorentz, qui peut être un « test » pour tester des modèles de gravité quantique. Mais la différence d'espace-temps n'est pas une condition suffisante pour la non-invariance de Lorentz: un contre-exemple est les ensembles causaux qui sont des structures discrètes et ne semblent pas la violer.

3.3.2. Gravité quantique à boucles

La gravité quantique à boucles (GQB) tente d'unifier la gravité avec les trois autres forces fondamentales en commençant par la relativité et en ajoutant des traits quantiques. Il est basé directement sur la formule géométrique d'Einstein.

Dans GQB, l'espace et le temps sont quantifiés tout comme l'énergie et la quantité de mouvement en mécanique quantique. L'espace et le temps sont granuleux et discrets, avec une taille minimale. L'espace est considéré comme un tissu extrêmement fin ou un réseau de boucles finies, appelées réseaux de spin ou mousse de spin, avec une taille limitée à moins que l'ordre d'une longueur de Planck, environ 10^{-35} mètres. Ses conséquences s'appliquent mieux à la cosmologie, dans l'étude de l'univers primitif et de la physique du Big Bang. Sa prédiction principale, non vérifiée, implique une évolution de l'univers au-delà du Big Bang (Big Bounce).

Toute théorie de la gravité quantique doit reproduire la théorie de la relativité générale d'Einstein comme une limite classique. La gravité quantique doit pouvoir revenir à la théorie classique lorsque $\hbar \rightarrow 0$. Pour cela, les anomalies quantiques doivent être évitées, afin de n'avoir aucune restriction sur l'espace physique de Hilbert sans correspondant en théorie classique. Il s'avère que la théorie quantique a moins de degrés de liberté que la théorie classique. Lewandowski, Okolow, Sahlmann et Thiemann[686] d'une part, et Christian Fleischhack[687] d'autre part, ont développé des théorèmes qui établissent l'unicité de la représentation de la boucle telle que définie par Ashtekar. Ces théorèmes excluent l'existence d'autres théories dans le programme de recherche GQB et donc, si GQB n'a pas la limite semi-classique correcte, cela signifierait la fin de la représentation GQB dans son intégralité.

---

[685] Rodolfo Gambini et Jorge Pullin, « Quantum Gravity Experimental Physics? », *General Relativity and Gravitation* 31, nº 11 (1 novembre 1999): 1999, https://doi.org/10.1023/A:1026701930767.

[686] Jerzy Lewandowski et al., « Uniqueness of Diffeomorphism Invariant States on Holonomy–Flux Algebras », *Communications in Mathematical Physics* 267, nº 3 (1 novembre 2006): 267 (3): 703–733, https://doi.org/10.1007/s00220-006-0100-7.

[687] Christian Fleischhack, « Irreducibility of the Weyl Algebra in Loop Quantum Gravity », *Physical Review Letters* 97, nº 6 (11 août 2006): 97 (6): 061302, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.061302.

Le programme gravité quantique canonique traite la métrique espace-temps comme un champ et la quantifie directement, l'espace étant divisé en grains tridimensionnelles. Le programme consiste à réécrire la relativité générale sous forme « canonique » ou « hamiltonienne » [688], à travers un ensemble de variables de configuration qui peuvent être encodées dans un espace de phase. L'évolution dans le temps de ces variables, les mouvements physiques possibles dans l'espace des phases, une famille de courbes, sont ensuite quantifiés, et l'évolution dynamique est générée à l'aide de l'opérateur hamiltonien[689]. Ainsi apparaissent certaines contraintes des variables canoniques imposées après quantification.

En gravité canonique à boucles, Ashtekar a utilisé un ensemble différent de variables avec une métrique plus complexe[690], atténuant plus facilement les contraintes. Grâce aux changements introduits dans le diagramme, toutes les caractéristiques géométriques standard de la relativité générale peuvent être récupérées[691]. L'avantage de cette version est un plus grand contrôle (mathématique) sur la théorie (et sa quantification).

Le programme GQB exige qu'une théorie de l'espace-temps soit indépendante du fond, contrairement à la théorie des cordes où l'espace-temps est traité comme un fond fixe. GQB utilise la formulation hamiltonienne ou canonique de la RG. L'avantage d'une formulation canonique d'une théorie est la facilité et la standardisation de la quantification. Les boucles du GQB nous donnent une description de l'espace. A l'intersection des boucles apparaissent des nœuds qui représentent des unités de base de l'espace, qui est donc discret ; deux nœuds reliés par un lien représentent deux unités d'espace côte à côte. La surface est déterminée par les intersections avec les boucles. On peut ainsi imaginer un graphe (réseau de spin)[692] constitué de certains nombres quantiques qui lui sont attachés. Les nombres déterminent les surfaces et les volumes d'espace[693]. Le problème du temps dans GQB est d'incorporer le temps dans cette image.

La GQB considère la RG comme un point de départ, auquel il applique une procédure de quantification pour arriver à une théorie quantique viable de la gravité. Dans la procédure de quantification, appelée quantification canonique, il est nécessaire de reformuler la RG comme un système hamiltonien, permettant ainsi une évolution temporelle de tous les degrés de liberté du

---

[688] Kuchař, « Canonical Quantization of Gravity ».

[689] Weinstein et Rickles, « Quantum Gravity ».

[690] Carlo Rovelli, « Notes for a brief history of quantum gravity », *arXiv:gr-qc/0006061*, 16 juin 2000, http://arxiv.org/abs/gr-qc/0006061.

[691] Lee Smolin, « The case for background independence », *arXiv:hep-th/0507235*, 25 juillet 2005, 196–239, http://arxiv.org/abs/hep-th/0507235.

[692] Le réseau de spin est un graphe dont les nœuds représentent des « grains » d'espace et dont les liens représentent des surfaces qui séparent ces grains, représentant un état quantique du champ gravitationnel ou de l'espace.

[693] Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?*

système. Les formules hamiltoniennes respectives divisent le grain d'espace-temps des hypersurfaces spatiales tridimensionnelles, à travers un formalisme appelé ADM d'après ses auteurs (Richard Arnowitt, Stanley Deser et Charles Misner). Le formalisme ADM suppose que les métriques induites sur les surfaces spatiales sont des variables de « position » et une combinaison linéaire des composantes de courbure extérieure de ces hypersurfaces codant leur incorporation dans l'espace-temps à 4 dimensions comme des variables « quantité de mouvement » conjuguées canoniquement avec les métriques[694]. Les équations hamiltoniennes résultantes ne sont pas équivalentes aux équations du champ d'Einstein. Pour les rendre équivalentes, des restrictions doivent être introduites, entraînant certaines conditions pour les données initiales. La première famille de contraintes code la liberté de choisir la foliation (contrainte hamiltonienne), et le deuxième ensemble de contraintes concerne la liberté de choisir les coordonnées dans l'espace tridimensionnel (contraintes vectorielles), ce qui donne un total de quatre équations de contraintes. Dans le GQB, il existe une famille de contraintes supplémentaires liées aux symétries internes. Jusqu'à présent, seules deux des trois familles de contraintes ont été résolues. La procédure de quantification canonique est réalisée selon Paul Dirac[695], transformant les variables canoniques en opérateurs quantiques qui agissent sur un espace d'état quantique.

L'utilisation du formalisme ADM a été frappée par des complications techniques insurmontables. Ainsi, dans les années 1980, Abhay Ashtekar a introduit de nouvelles variables qui simplifiaient les équations des contraintes, avec l'inconvénient de perdre la signification géométrique directe des variables ADM. Dans ce cas, la géométrie spatio-temporelle est capturée par un « champ triadique » qui code pour les cadres inertiels locaux définis sur des hypersurfaces spatiales, plutôt que les métriques. Le passage d'ADM aux variables Ashtekar représente une réinterprétation des équations du champ d'Einstein. La théorie généralisée de la relativité réinterprétée est ensuite soumise à la procédure canonique comme ci-dessus. [696]

Dans de nombreuses approches de la gravité quantique, y compris la théorie des cordes et le GQB, l'espace n'est plus une entité fondamentale, mais simplement un phénomène « émergent » qui découle de la physique de base[697]. Christian Wüthrich déclare qu'il n'est pas clair si nous pouvons formuler une théorie physique de manière cohérente en l'absence d'espace et de temps. [698]

---

[694] Christian Wuthrich, « In Search of Lost Spacetime: Philosophical Issues Arising in Quantum Gravity » (2011).

[695] Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics*.

[696] Wuthrich, « In Search of Lost Spacetime ».

[697] Wuthrich.

[698] Wuthrich, « To quantize or not to quantize », 72 : 777-788.

Une approche plus récente consiste à utiliser des modèles dits de « mousse de spin » [699], qui utilisent l'intégration de chemin pour générer l'espace-temps. L'évolution dans le temps des réseaux de spin est supposée représenter l'espace-temps spatial en termes de mousse de spin.

GQB est un vaste programme de recherche actif, développé dans plusieurs directions avec le même noyau dur[700]. Deux directions de développement sont plus importantes : le GQB canonique plus traditionnel et le GQB covariant, appelé la théorie de la mousse de spin.

La gravité quantique à boucles résulte d'une tentative de formuler une théorie quantique indépendante du fond. Cela prend en compte l'approche de la relativité générale selon laquelle l'espace-temps est un champ dynamique et, par conséquent, un objet quantique. La deuxième hypothèse de la théorie est que la nature discrète quantique qui détermine le comportement similaire aux particules d'autres théories de champ affecte également la structure de l'espace. Il en résulte une structure granulaire de l'espace à la longueur de Planck. L'état quantique de l'espace-temps est décrit au moyen d'une structure mathématique appelée réseau de spin. Les réseaux de spin ne représentent pas des états quantiques d'un champ dans l'espace, mais des états quantiques de l'espace-temps. La théorie a été obtenue en reformulant la relativité générale à l'aide des variables d'Ashtekar[701]. Actuellement, il existe plusieurs heuristiques positives sur la base desquelles la dynamique de la théorie se développe.

La thermodynamique du trou noir tente de réconcilier les lois de la thermodynamique avec les horizons d'événements du trou noir. Un succès récent de la théorie est le calcul de l'entropie de tous les trous noirs non singuliers directement à partir de la théorie et indépendamment des autres paramètres. Il s'agit de la seule dérivation connue de cette formule à partir d'une théorie fondamentale, dans le cas de trous noirs génériques non singuliers. La théorie a également permis le calcul des corrections de gravité quantique à l'entropie et au rayonnement des trous noirs.

En 2014, Carlo Rovelli et Francesca Vidotto ont suggéré, sur la base de GQB, qu'il y a une étoile Planck à l'intérieur d'un trou noir, essayant ainsi de résoudre la protection du trou noir et le paradoxe de l'information du trou noir.

La *cosmologie quantique à boucle* (CQB) a prédit un Big Bounce avant le Big Bang. CQB a été développé en utilisant des méthodes qui imitent celles de GQB, qui prédit un « pont quantique » entre les branches cosmologiques contractantes et expansives. Grâce au CQB, les singularités du

---

[699] John W. Barrett et Louis Crane, « Relativistic spin networks and quantum gravity », *Journal of Mathematical Physics* 39, nº 6 (juin 1998): 32:3296–3302, https://doi.org/10.1063/1.532254.

[700] Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics*.

[701] Abhay Ashtekar, « New Variables for Classical and Quantum Gravity », *Physical Review Letters* 57, nº 18 (3 novembre 1986): 57 (18): 2244–2247, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.2244.

Big Bang, du Big Bounce et d'un mécanisme naturel d'inflation ont été prédits. Mais les résultats obtenus sont soumis à restriction en raison de la suppression artificielle des degrés de liberté. L'évitement des singularités dans la CQB se fait grâce à des mécanismes disponibles uniquement dans ces modèles restrictifs; l'évitement des singularités dans la théorie complète ne peut être atteint que par une caractéristique plus subtile du GQB.

La reproduction de la RG en tant que limite de basse énergie dans la GQB n'a pas été confirmée et les amplitudes de diffusion n'ont pas encore été calculées.

Les problèmes les plus pressants du GQB sont notre manque de compréhension de la dynamique (l'incapacité à résoudre l'équation de contrainte hamiltonienne) et l'incapacité d'expliquer comment apparaît l'espace lisse classique (comment RG réussit dans ce cas).

Un autre problème de la GQB est un problème général de la mécanique quantique : le temps. Carlo Rovelli et Julian Barbour ont essayé de formuler la mécanique quantique d'une manière qui ne nécessite pas de temps externe, remplaçant le temps en reliant directement les événements entre eux. [702]

Les effets de la gravité quantique sont difficiles à mesurer car la longueur de Planck est beaucoup trop petite, mais nous essayons de mesurer les effets des observations astrophysiques et des détecteurs d'ondes gravitationnelles. Il n'a pas encore été prouvé que la description GQB de l'espace-temps à l'échelle de Planck a la limite continue correcte décrite par la relativité générale avec d'éventuelles corrections quantiques. D'autres problèmes non résolus comprennent la dynamique de la théorie, les contraintes, le couplage avec les champs de matière, la renormalisation du graviton. [703]

Il n'existe pas encore une observation expérimentale pour laquelle GQB aurait fait une prédiction différente du modèle standard ou de la relativité générale. En raison de l'absence d'une frontière semi-élastique, GQB n'a pas reproduit les prédictions faites par la relativité générale.

La GQB a des difficultés à essayer de permettre la théorie de la relativité générale à la limite semi-classique, parmi lesquelles

- Il n'y a pas d'opérateur qui réponde aux difféomorphismes infinitésimaux, il doit être approximé par des difféomorphismes finis et donc la structure des parenthèses de Poisson

[702] Carlo Rovelli, « Relational Quantum Mechanics », *International Journal of Theoretical Physics* 35, nº 8 (août 1996): 35 : 1637-1678, https://doi.org/10.1007/BF02302261.

[703] Hermann Nicolai, Kasper Peeters, et Marija Zamaklar, « Loop quantum gravity: an outside view », *Classical and Quantum Gravity* 22, nº 19 (7 octobre 2005): 22(19): R193–R247, https://doi.org/10.1088/0264-9381/22/19/R01.

classiques n'est pas exactement reproduite. Le problème peut être contourné en introduisant des contraintes. [704]

- La difficulté de concilier la nature combinatoire discrète des états quantiques avec la nature continue des champs de la théorie classique.
- Difficultés découlant de la structure des parenthèses de Poisson qui impliquent un difféomorphisme spatial et des contraintes hamiltoniennes. [705]
- Les mécanismes semi-classiques développés ne conviennent qu'aux opérateurs qui ne modifient pas le graphique.
- Le problème de la formulation d'observables pour la relativité générale en raison de sa nature non linéaire et de l'invariance du difféomorphisme espace-temps. [706]

GQB est une solution possible de la gravité quantique, tout comme la théorie des cordes mais avec des différences. Contrairement à la théorie des cordes qui postule des dimensions supplémentaires et des particules et symétries supplémentaires non observées, GQB est basé uniquement sur la théorie quantique et la relativité générale, et sa portée se limite à la compréhension des aspects quantiques de l'interaction gravitationnelle. De plus, les conséquences du GQB sont radicales, modifiant fondamentalement la nature de l'espace et du temps.

3.4 La théorie des cordes

Dans la théorie du champ quantique, le principal obstacle est l'émergence des infinités infratractables dans les interactions des particules en raison de la possibilité de distances arbitraires entre les particules ponctuelles. Les cordes, comme des objets étendus, fournissent un meilleur cadre, qui permet des calculs finis[707]. La théorie des cordes fait partie d'un programme de recherche dans lequel les particules ponctuelles en physique des particules sont remplacées par des objets unidimensionnels appelés cordes. Elle décrit comment ces cordes se propagent dans l'espace et interagissent les unes avec les autres. À plus grande échelle, une corde ressemble à une particule ordinaire, avec une masse, une charge et d'autres propriétés déterminées par l'état vibratoire de la corde. L'un des états vibrationnels des cordes correspond au graviton, la particule hypothétique en mécanique quantique pour la force gravitationnelle[708]. La théorie des cordes se manifeste généralement dans des énergies très élevées, telles que la physique des trous noirs, la cosmologie

---

[704] Thomas Thiemann, *Modern Canonical Quantum General Relativity*, 1 edition (Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2008).

[705] Thiemann.

[706] B. Dittrich, « Partial and Complete Observables for Hamiltonian Constrained Systems », *General Relativity and Gravitation* 39, nº 11 (1 novembre 2007): 39 (11): 1891–1927, https://doi.org/10.1007/s10714-007-0495-2.

[707] Dawid, « Scientific Realism in the Age of String Theory ».

[708] Katrin Becker, Melanie Becker, et John H. Schwarz, *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction* (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2007), 2-3.

du premier univers, la physique nucléaire et la physique de la matière condensée. La théorie des cordes tente d'unifier la physique de la gravité et des particules, et ses versions ultérieures tentent de modifier toutes les forces fondamentales de la physique. [709]

Le but de la théorie des cordes était de remplacer les particules élémentaires par des cordes unidimensionnelles afin d'unifier la physique quantique et la gravité.

Le programme de recherche sur la théorie des cordes est basé sur l'hypothèse de 1930 que la relativité générale ressemble à la théorie d'un champ de spin-deux sans masse dans l'espace plat minkowskian[710]. La quantification d'une telle théorie s'est avérée être renormalisable sans perturbation, impliquant une infinité qui ne peut être éliminée. Cette première théorie a été abandonnée jusqu'au milieu des années 1970, lorsqu'elle s'est développée en tant que théorie des cordes unidimensionnelle.

À noter que la théorie des cordes a été initialement développée, à la fin des années 1960 et au début des années 1970, en physique des particules - la *théorie bosonique des cordes*, qui ne traitait que des bosons. Après un succès temporaire en tant que théorie des hadrons, la chromodynamique quantique a été reconnue comme la théorie correcte des hadrons. En 1974, Tamiaki Yoneya a découvert que la théorie prévoit une particule massive de spin 2, considérée comme un graviton. John Schwarz et Joel Scherk ont réintroduit la théorie de Kaluza-Klein pour des dimensions supplémentaires, ont récupéré le programme de bootstrap abandonné et ont ainsi commencé le programme de recherche sur la théorie des cordes en gravité quantique. Un exemple typique de relance d'un programme de recherche au sens de Lakatos (le programme bootstrap) et de changement de direction de recherche d'un autre programme (théorie des cordes) dont l'heuristique, en ajoutant une théorie supplémentaire (Kaluza-Klein), s'est avérée être beaucoup plus utile dans une direction différente de celle initialement envisagée. Plus tard, il a été développé dans la *théorie des supercordes*, basé sur la supersymétrie entre les bosons et les fermions[711], puis est apparu d'autres versions de la théorie. Au milieu des années 1990, les scientifiques se sont concentrés sur le développement d'un programme de recherche unificateur, une théorie à onze dimensions appelée la théorie M.

Les cordes n'ont pas de nombres quantiques, mais elles diffèrent par leur forme topologique (ouverte ou fermée, modes de compactage) et leur dynamique (modes d'oscillation). Ils peuvent être perçus à l'échelle macroscopique comme des particules ponctuelles avec certains nombres quantiques. Changer le mode d'oscillation correspond à une transformation vers une autre particule.

---

[709] Becker, Becker, et Schwarz, 3, 15-16.

[710] A. Capelli, « The Birth of String Theory Edited by Andrea Cappelli », Cambridge Core, avril 2012, https://doi.org/10.1017/CBO9780511977725.

[711] Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 4.

Les cordes au niveau fondamental n'ont pas des constants de couplage. L'interaction entre eux correspond à leur dynamique. [712]

Pour chaque version de la théorie des cordes, il n'y a qu'un seul type de corde, comme une petite boucle ou un segment de corde, qui peut vibrer de différentes manières. Dans le programme de recherche sur la théorie des cordes, l'échelle de longueur caractéristique des cordes est de l'ordre de la longueur de Planck (10^{-35} mètres), sur laquelle les effets de la gravité quantique sont considérés comme importants[713]. Aux dimensions ordinaires, ces objets ne peuvent pas être distingués des particules ponctuelles de dimension zéro. Il existe plusieurs variantes de la théorie des supercordes : type I, type IIA, type IIB et deux types de cordes hétérotiques, SO(32) et E8×E8.

Les théories des cordes nécessitent des dimensions d'espace-temps supplémentaires pour la cohérence mathématique. Dans la théorie des cordes bosoniques, l'espace-temps est à 26 dimensions, tandis que dans la théorie des supercordes, il est à 10 dimensions, et dans la théorie M, il est à 11 dimensions. Ces dimensions supplémentaires ne seront pas observées dans les expériences[714], en raison de leur compactage par lequel elles « se ferment » sur elles-mêmes en formant des cercles. A la limite, lorsque ces dimensions supplémentaires tendent vers zéro, elles atteignent l'espace-temps habituel. Pour que les théories décrivent correctement le monde, les dimensions compactées doivent être sous la forme de la variété topologique Calabi-Yau. [715]

Une autre façon de réduire le nombre des dimensions est d'utiliser le scénario de cosmologie des membranes (« cosmologie branaire »), en considérant l'univers observable comme un sous-espace tridimensionnel d'un espace multidimensionnel. Dans ces modèles, la gravité apparaît à partir des cordes fermées dans un espace multidimensionnel, expliquant ainsi la puissance de gravité inférieure par rapport aux autres forces fondamentales[716]. En théorie des cordes, une *brane* (en abrégé de « membrane ») généralise la notion de particule ponctuelle à des dimensions autres que zéro. Les branes sont des corps physiques qui obéissent aux règles de la mécanique quantique. [717]

Une particularité des théories de ce programme de recherche sont les « dualités », des transformations mathématiques qui identifient les théories physiques au sein de ce programme entre

---

[712] Vincent Lam, « Quantum Structure and Spacetime. », *Metaphysics in Contemporary Physics*, 1 janvier 2016, 81-99, https://doi.org/10.1163/9789004310827_005.

[713] Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 6.

[714] Barton Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 2 edition (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2009).

[715] Shing-Tung Yau, *The Shape of Inner Space*, Reprint edition (Basic Books, 2012), chap. 6.

[716] Randall et Sundrum, « An Alternative to Compactification », 83 (23): 4690–4693.

[717] Gregory Moore, « What Is... a Brane? », *Notices of the American Mathematical Society* 52, nº 2 (28 novembre 2005): 214, https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/what-is-a-brane.

elles, tirant la conclusion que toutes ces théories sont subsumées en une seule, la *théorie M*[718]. Deux théories sont duales si elles sont exactement équivalentes en termes de conséquences observationnelles, bien qu'elles soient construites différemment et puissent impliquer différents objets et scénarios topologiques[719]. Les différentes théories du programme de recherche sur la théorie des cordes sont liées par plusieurs relations, l'une étant la relation de correspondance spécifique appelée dualité S[720]. Une autre relation, appelée la dualité T, considère les cordes qui se propagent autour d'une dimension circulaire supplémentaire. En 1997, la correspondance de la théorie des champs anti-Sitter/conformes (*AdS/CFT*) [721] a été découverte, qui relie la théorie des cordes à une théorie quantique des champs[722]. Dans un cadre plus général, la correspondance AdS/CFT est une dualité qui met en corrélation la théorie des cordes avec d'autres théories physiques mieux comprises théoriquement, avec des implications dans l'étude des trous noirs et de la gravité quantique, mais aussi en physique nucléaire[723] et en matière condensée. [724]

Les dualités de la théorie des cordes ont été liées par les philosophes à des problèmes spécifiques à la philosophie, tels que la sous-détermination, le conventionnalisme et l'émergence / la réduction. Ainsi, l'espace-temps est devenu considéré par certains physiciens comme une entité émergente, qui dépend, par exemple, de la puissance de couplage qui régit les interactions physiques. Selon la dualité ADS / CFT, une théorie des cordes à 10 dimensions est équivalente à une théorie de jauge à 4 dimensions - la dualité « jauge / gravité ». Il résulte de ces dualités que les théories, étant équivalentes, ne sont pas fondamentales, et donc ni l'espace-temps décrit n'est fondamental, mais un phénomène émergent[725]. Dans ce programme, la théorie de jauge et la théorie gravitationnelle sont les limites classiques d'une théorie quantique plus complète et unificatrice. Les philosophes se demandent si deux théories duales sont physiquement distinctes ou seulement des variantes de notation de la même théorie. [726] [727]

---

[718] Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 9-12.

[719] Dawid, « Scientific Realism in the Age of String Theory ».

[720] Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*.

[721] Becker, Becker, et Schwarz, 14-15.

[722] Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 376.

[723] Igor R. Klebanov et Juan M. Maldacena, « Solving quantum field theories via curved spacetimes », *Physics Today* 62, nº 1 (1 janvier 2009): 62 (1): 28–33, https://doi.org/10.1063/1.3074260.

[724] Subir Sachdev, « Strange and Stringy », *Scientific American* 308 (1 décembre 2012): 308 (44): 44–51, https://doi.org/10.1038/scientificamerican0113-44.

[725] Tiziana Vistarini, « Emergent Spacetime in String Theory », 2013, 103.

[726] Joseph Polchinski, « Dualities of Fields and Strings », *arXiv:1412.5704 [hep-th]*, 17 décembre 2014, http://arxiv.org/abs/1412.5704.

[727] Rickles, « A philosopher looks at string dualities », 42: 54–67.

En 1995, Edward Witten a suggéré que les cinq familles de théories du programme de recherche sur la théorie des cordes sont des cas limites particuliers d'une théorie à 11 dimensions appelée théorie M[728]. En 1997, Tom Banks, Willy Fischler, Stephen Shenker et Leonard Susskind ont proposé un modèle matriciel pour la théorie M à 11 dimensions, où la limite d'énergie réduite de ce modèle est la supergravité à onze dimensions. [729]

Feynman considère la théorie quantique de la gravité comme « juste une autre théorie du champ quantique » telle que l'électrodynamique quantique. Différents types de particules existantes sont différentes excitations de la même corde. Étant donné que l'un des modes d'oscillation des cordes est un état sans masse et spin-2 qui s'identifie au graviton, la théorie des cordes inclut nécessairement la gravité quantique. La théorie des cordes modifie la gravité ponctuelle des particules à courte distance par l'échange des états massifs de cordes[730]. En théorie des cordes, la dimension espace-temps n'est pas une propriété intrinsèque de la théorie elle-même, mais une propriété de la solution particulière.

Bien que la théorie des cordes ne puisse pas actuellement fournir de prédictions falsifiables, elle a cependant inspiré de nouvelles propositions imaginatives pour résoudre des problèmes en suspens en physique des particules et en cosmologie. La théorie des cordes de la première période, lorsqu'elle traitait la physique des hadrons, peut expliquer pourquoi les fermions se présentent en trois générations hiérarchiques et les taux de mélange entre les générations de quarks[731]. Dans la deuxième période où elle a approché la gravité quantique, la théorie a abordé le paradoxe de l'information sur le trou noir, en comptant l'entropie correcte des trous noirs[732] et les processus de changement de la topologie[733]. La découverte de la correspondance AdS / CFT a conduit à une formulation de la théorie des cordes basée sur la théorie des champs quantiques, mieux comprise, et a fourni un cadre général pour résoudre les paradoxes des trous noirs[734], comme dans le

---

[728] Michael J. Duff, « The Theory Formerly Known as Strings », *Scientific American* 278 (1 février 1998): 278 (2): 64–9, https://doi.org/10.1038/scientificamerican0298-64.

[729] T. Banks et al., « M theory as a matrix model: A conjecture », *Physical Review D* 55, nº 8 (15 avril 1997): 55 (8): 5112–5128, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.5112.

[730] Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation*.

[731] Jonathan J. Heckman et Cumrun Vafa, « Flavor Hierarchy From F-theory », *Nuclear Physics B* 837, nº 1-2 (septembre 2010): 837 (1): 137–151, https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2010.05.009.

[732] Andrew Strominger et Cumrun Vafa, « Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy », *Physics Letters B* 379, nº 1 (27 juin 1996): 379 (1–4): 99–104, https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00345-0.

[733] A. Adams et al., « Things Fall Apart: Topology Change from Winding Tachyons », *Journal of High Energy Physics* 2005, nº 10 (11 octobre 2005): (10): 033, https://doi.org/10.1088/1126-6708/2005/10/033.

[734] Sebastian de Haro et al., « Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations », *Foundations of Physics* 43, nº 1 (1 janvier 2013): 2, https://doi.org/10.1007/s10701-012-9691-3.

rayonnement Hawkins des trous noirs (paradoxe de l'information) [735]. Grâce à son programme de recherche, il a mené à de nombreuses découvertes théoriques en mathématiques et en théorie des jauges.

La théorie des cordes est considérée comme un outil utile pour étudier les propriétés théoriques de la thermodynamique des trous noirs[736], respectivement leur entropie[737]. La base théorique de ces investigations a considéré le cas des trous noirs idéalisés, avec la plus petite masse possible compatible avec une tâche donnée[738]. Ce résultat peut être généralisé à n'importe quelle théorie de la gravité[739] et peut s'étendre aux trous noirs astrophysiques non extrêmes. [740]

Dans la théorie du Big Bang, qui fait partie du modèle cosmologique prédominant pour l'univers, l'expansion rapide initiale de l'univers est causée par une particule hypothétique appelée inflaton. Les propriétés exactes de cette particule ne sont pas connues. Ils devraient être dérivés d'une théorie plus fondamentale, telle que la théorie des cordes[741]. L'élaboration de ce sous-programme dans le cadre du programme de recherche sur la théorie des cordes est en cours d'élaboration. [742]

Dans la théorie des branes, les branes D ont été identifiées avec des solutions de supergravitation avec de trous noirs. Leonard Susskind a identifié le principe holographique de Gerardus 't Hooft avec des états communs de trous noirs thermiques.

Récemment, certaines expériences dans d'autres domaines, comme la physique de la matière condensée, ont utilisé des résultats théoriques de la théorie des cordes[743]. Et l'inséparabilité quantique dans les supraconducteurs est largement basée sur les idées de dualité et de dimensions spatiales supplémentaires développées dans la théorie des cordes. À l'aide de la dualité entre les théories de jauge à 4 dimensions et la gravité à 5 dimensions, les théoriciens des cordes ont prédit

---

[735] Leonard Susskind, *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*, Reprint edition (New York: Back Bay Books, 2009).

[736] de Haro et al., « Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations », 2.

[737] Yau, *The Shape of Inner Space*, 189.

[738] Yau, 192-93.

[739] Andrew Strominger, « Black Hole Entropy from Near-Horizon Microstates », *Journal of High Energy Physics* 1998, nº 02 (15 février 1998): (2): 009, https://doi.org/10.1088/1126-6708/1998/02/009.

[740] Alejandra Castro, Alexander Maloney, et Andrew Strominger, « Hidden conformal symmetry of the Kerr black hole », *Physical Review D* 82, nº 2 (13 juillet 2010): (2): 024008, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.024008.

[741] Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 533.

[742] Becker, Becker, et Schwarz, 539-43.

[743] Sachdev, « Strange and Stringy », 44-51.

la valeur expérimentale de l'entropie dans le plasma, un résultat qui n'est obtenu par aucun autre modèle théorique, mais ce ne sont pas des validations expérimentales absolues.[744] [745]

On espère que les dimensions supplémentaires pourront être observées à l'aide du Grand collisionneur de hadrons du CERN, Genève, mais un éventuel déni ne signifierait pas une réfutation de la théorie.

Pour de nombreux chercheurs, la théorie de la jauge est considérée comme le seul moyen de renormaliser les relations, et la théorie des cordes est la seule option pour éliminer les infinités d'un programme unificateur de la physique quantique et de la gravité. La théorie des cordes a été expérimentalement corroborée initialement en tant que théorie de la physique des particules, mais dans le développement actuel, elle est considérée comme loin d'être falsifiable. La poursuite du programme est basée sur la confiance que la théorie est le meilleur candidat pour un programme unificateur total. Sa crédibilité est renforcée par les interconnexions créées au cours de son développement, comme dans le cas de la supersymétrie et de la cosmologie des trous noirs.

La théorie des cordes n'a toujours pas de définition satisfaisante en toutes circonstances. La théorie utilise des techniques perturbatrices[746], mais n'a pas encore clarifié les aspects de la détermination des propriétés de l'univers[747], elle a donc résumé les critiques des scientifiques, remettant en question la valeur de la recherche dans cette direction.[748]

Les critiques de la théorie des cordes attirent l'attention sur le grand nombre de solutions possibles décrites par la théorie des cordes. Selon Woit,

> « L'existence possible, par exemple, de 10^{500} des états de vide différents dans la théorie des supercordes, détruit probablement l'espoir d'utiliser la théorie pour prédire quoi que ce soit. Si l'on choisit seulement parmi les états dont les propriétés sont en accord avec les observations

---

[744] Dawid, *String Theory and the Scientific Method*.

[745] Paul Verhagen, « Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory » (Amsterdam University College, 2015), http://www.uva.nl/binaries/content/documents/personalpages/h/a/s.deharo/en/tab-three/tab-three/cpitem%5B8%5D/asset.

[746] Becker, Becker, et Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 8.

[747] Becker, Becker, et Schwarz, 13-14.

[748] Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*.

> expérimentales actuelles, il est probable qu'il y en aura toujours un si grand nombre que toute valeur souhaitée pourra être obtenue pour les résultats de toute nouvelle observation. »[749]

Les adeptes de la théorie soutiennent que cela peut être un avantage, permettant une explication anthropique naturelle des valeurs observées des constantes physiques.[750]

Une autre critique porte sur la dépendance de la théorie de fond, par opposition à la relativité générale. Lee Smolin soutient que c'est la principale faiblesse de la théorie des cordes en tant que théorie de la gravité quantique.[751]

Les solutions de la théorie ne sont pas uniques et il n'y a pas de mécanisme perturbateur pour sélectionner une solution particulière ou pour choisir le vrai vide. Ainsi, la formulation perturbative de la théorie des cordes perd son pouvoir prédictif. De plus, il n'y a pas de mécanisme de perturbation pour sélectionner des solutions qui prennent en charge des spectres de basse énergie qui ne sont pas supersymétriques.[752]

Paul Verhagen se demande comment évaluer la théorie des cordes ; une théorie qui a des difficultés considérables avec la vérification expérimentale peut-elle être classée comme une science? Pour répondre à cette question, nous devons analyser les origines des différents concepts utilisés en théorie, évaluer la nécessité d'une grande théorie unifiée et nous concentrer sur l'évaluation de sa situation scientifique. Certains soutiennent que la théorie des cordes a échoué, tandis que d'autres soulignent ses progrès théoriques. Il existe à cet égard une « rupture méta-paradigmatique » entre expérimentateurs et théoriciens.[753]

Chalmers estime qu'une théorie doit être falsifiable au sens de Popper[754] pour être scientifique : « Si une déclaration est indifférenciée, alors le monde peut avoir des propriétés et peut se comporter de quelque manière que ce soit, sans conflit avec la déclaration. »[755] En ce sens, la théorie des cordes est considérée comme non falsifiable[756]. La technologie actuelle n'est pas suffisamment

---

[749] Peter Woit, *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*, Reprint edition (Basic Books, 2007), 242.

[750] Woit, 242.

[751] Smolin, *The Trouble With Physics*, 184.

[752] Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation*.

[753] Verhagen, « Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory ».

[754] Popper, *Conjectures and Refutations*.

[755] Alan F. Chalmers, *What Is This Thing Called Science?*, 3 edition (Indianapolis: Hackett Publishing Co., 1999), 63.

[756] H. Georgi et Paul Davies, *Grand Unified Theories, in The New Physics* (Cambridge University Press, 1992).

précise pour développer des expériences permettant de vérifier la théorie des cordes. Mais la théorie est falsifiable « potentielle »; fait des prédictions, telles que l'existence de dimensions supplémentaires, mais elles ne peuvent pas être vérifiées, du moins pour l'instant. Et toutes les conséquences mathématiques des axiomes n'ont pas encore été élaborées pour détecter d'éventuels conflits avec la réalité observée. Mais des efforts sont faits dans ce sens, tant pour la partie expérimentale que pour la partie théorique.

Les physiciens des cordes sont accusés d'ignorer la testabilité empirique et remplacent ce critère par des arguments mathématiques. Certaines des questions des physiciens et des philosophes sont :

1. Une théorie doit-elle être testable ou les expériences mentales sont-elles suffisantes ?
2. Une théorie doit-elle faire des prédictions vérifiables ou la testabilité indirecte est-elle suffisante ?
3. La théorie sans prédiction, uniquement les distributions de probabilité, est-elle considérée comme testable ?
4. Les tests doivent-ils être nécessairement empiriques ou les contrôles de cohérence mathématique peuvent-ils être considérés comme des tests ?
5. Si des résultats contradictoires ou inacceptables sont obtenus à partir de tests mentaux par réduction à l'absurdité, quelle valeur ont ces tests ?
6. Quand la testabilité peut-elle être demandée ? La possibilité de futurs tests est-elle valable ?
7. Quelle est l'importance de la testabilité par rapport à d'autres désirs épistémiques ? Une théorie est-elle facile à tester mais avec une faible valeur explicative est préférable à une théorie non testable mais avec un pouvoir explicatif plus élevé ? Mais si la théorie testable est trop compliquée et la théorie non-testable est simple et élégante ?
8. Les prévisions de nouveaux phénomènes sont-elles plus importantes que les pré- ou rétrodictions de phénomènes déjà connus ? [757]

Reiner Hedrich suggère[758] que l'échec actuel de la théorie des cordes pourrait être dû au mauvais dispositif mathématique choisi, en utilisant les mathématiques du continuum. Il est possible que lorsque la théorie trouve son principe fondamental, elle puisse conduire à une base mathématique plus appropriée. Une formulation indépendante de fond et un principe holographique pourraient aider l'heuristique à trouver ce principe. Mais il est possible que le principe ne soit jamais trouvé, peut-être en raison de fausses hypothèses de base.

---

[757] Helge Kragh, « Fundamental Theories and Epistemic Shifts: Can History of Science Serve as a Guide? », *arXiv:1702.05648 [physics]*, 18 février 2017, http://arxiv.org/abs/1702.05648.

[758] Reiner Hedrich, « The Internal and External Problems of String Theory: A Philosophical View », *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 38, nº 2 (2006): 261–278.

Actuellement, la théorie des cordes est le programme de recherche dominant dans la physique théorique des hautes énergies[759], considéré par certains scientifiques comme sans alternatives viables[760]. Peter Woit considère ce statut de la théorie comme malsain et préjudiciable à l'avenir de la physique fondamentale, sa popularité en grande partie en raison de la structure financière de l'environnement académique et de la concurrence féroce des ressources limitées[761]. Roger Penrose exprime des opinions similaires, déclarant : « La concurrence souvent frénétique que cette facilité de communication crée conduit à des effets de mouvement, où les chercheurs ont peur de prendre du retard s'ils ne se joignent pas. » [762]

Les positivistes logiques ont considéré que la méthode scientifique signifie la déduction des modèles de la nature des observations. La théorie des cordes a été initialement développée sur la base d'un fait observé, les pentes de Regge, qui à l'heure actuelle n'est plus considérée comme expliquée par cette théorie. Et la théorie n'a jusqu'à présent été confirmée par aucune expérience ou observation empirique. Mais il a continué à se développer, soutenu par la croyance de nombreux physiciens qu'il est bien meilleur que la théorie du champ quantique pour la gravité quantique, et dans l'espoir qu'il aidera à unifier la gravité avec les autres forces fondamentales. La plupart des adeptes semblent être complètement indifférents aux expériences et observations, étant plutôt préoccupés par « l'élégance » de la formulation mathématique de la théorie[763]. Pour cette raison, une réconciliation entre la théorie des cordes et les positivistes logiques semble impossible. [764]

Richard Dawid soutient que la théorie des cordes est basée sur des observations, mais son problème serait l'énorme « distance théorique » entre les phénomènes observables et les concepts scientifiques. Certains chercheurs soutiennent que le principe de la sous-détermination empirique des théories scientifiques n'admet pas que cette « distance théorique » puisse être faite pour permettre des affirmations fiables sur la nature. À cette fin, Dawid estime que le principe de la sous-détermination doit être remplacé par des arguments qui soutiennent la théorie des cordes. Le problème de cette théorie est, selon Dawid, l'arbitraire dans le choix de ses principes fondamentaux. La théorie a un certain ensemble de postulats physiques, mais il y a une érosion continue de ces postulats qui suit un chemin linéaire déterminé de manière unique. Ainsi, Dawid déclare que le désaccord entre les théoriciens des cordes et les physiciens phénoménologiques concernant le statut des cordes disparaît en raison d'un changement spectaculaire dans les caractéristiques de la théorie scientifique : l'ancien concept de sous-détermination des théories scientifiques dans la physique des

---

[759] Penrose, *The Road to Reality*, 1017.

[760] Woit, *Not Even Wrong*, chap. 16.

[761] Woit, 239.

[762] Penrose, *The Road to Reality*, 1018.

[763] F. David Peat, *Superstrings and the Search for the Theory of Everything*, 1 edition (Place of publication not identified: McGraw-Hill Education, 1989), 276.

[764] Verhagen, « Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory ».

particules moderne perd progressivement du terrain par rapport à la théorie de l'unicité. La théorie des cordes induirait une nouvelle compréhension de ce que l'on pourrait appeler une déclaration scientifique sur la nature : la revendication d'unicité théorique est suffisante pour l'adoption d'une nouvelle théorie scientifique. [765]

En 1995, à partir des théories des cordes unificatrices, le programme de recherche sur la gravité le plus exigeant, unificateur, la théorie M à 11 dimensions est née[766], afin d'unifier la gravité avec toutes les autres forces fondamentales de la physique.

3.4.1 Heuristique de la théorie des cordes

Les positivistes logiques auraient considéré la théorie des cordes comme une métaphysique spéculative. L'aspect instrumentaliste du positivisme logique ne correspond pas aux opinions des théoriciens des cordes.

Du point de vue de la falsifiabilité de Popper[767], nous distinguons clairement le contexte de la découverte et le contexte de la justification. Dans le cadre de la découverte, il n'y a pas de règles méthodologiques, mais il existe des règles strictes pour tester les hypothèses, en évitant autant que possible les hypothèses *ad hoc*, qui doivent de toute façon être vérifiables indépendamment. La théorie des cordes n'a pas encore été testée et est déjà entrée dans une phase d'hypothèses *ad hoc*. Mais il n'a pas été réfuté jusqu'à présent, et la théorie permet de tester à travers des expériences, même s'il n'y a pas encore la technologie nécessaire pour développer ces expériences. Une situation inattendue pour Popper ?

Kuhn a adopté une perspective externaliste dans la philosophie des sciences. Les motivations scientifiques ne parviennent pas toujours à expliquer les changements de paradigme, car d'autres causes externes, y compris sociales, peuvent entrer dans cette équation[768]. La théorie de Kuhn est plutôt un compte rendu rétrospectif de l'histoire de la science, jamais destinée à fournir une méthodologie de force normative[769]. La théorie de Thomas Kuhn sur les révolutions scientifiques en changeant les « paradigmes » peut également être appliquée à la théorie des cordes en tant que nouveau paradigme en physique des hautes énergies. Mais un changement de paradigme implique d'abandonner l'ancien paradigme, de passer par une période de « crise » dans laquelle se produisent

---

[765] Dawid, « Scientific Realism in the Age of String Theory ».

[766] Duff, « The Theory Formerly Known as Strings », 278 (2): 64–9.

[767] Popper, *The Logic of Scientific Discovery*.

[768] Thomas S. Kuhn et Jim Conant, *The Road Since Structure: Philosophical Essays, 1970-1993, with an Autobiographical Interview* (University of Chicago Press, 2000), 286-87.

[769] Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?*

des anomalies et des observations qui contredisent l'ancien paradigme[770]. Les anomalies sont des divergences entre la théorie et l'expérience. Mais en théorie des cordes, il n'y a pas d'expériences, et des problèmes de nature théorique sont connus depuis le début. Ainsi, le nouveau paradigme ne semble pas meilleur que l'ancien.

Comme la théorie des cordes n'a jusqu'à présent pas pu expliquer les phénomènes, il peut sembler que cela confirme l'opinion de Feyerabend selon laquelle il n'y a pas de « méthode » de la science. Et pourtant, la théorie des cordes est toujours le programme de recherche le plus actif pour la gravité quantique. Mais, par rapport à d'autres théories non falsifiables, cela a quelque chose de plus, en particulier : le langage mathématique, avec une logique claire de décoctions. Jusqu'à un certain point, il peut reproduire les théories de jauge classiques et la relativité générale. Et il y a de l'espoir que dans un avenir pas trop lointain, des expériences pourront être développées pour tester la théorie.

Keizo Matsubara appelle la théorie des cordes un « programme de recherche » et c'est dans le sens de Lakatos[771]. Hacking a repris la théorie de Lakatos[772], mais pas comme norme méthodologique, mais plutôt comme méthode de reconstruction rationnelle des périodes de l'histoire des sciences. Keizo Matsubara prend en charge la méthodologie Lakatos, soulignant ses principales caractéristiques en théorie des cordes[773] :

Le noyau dur :

1. Les objets fondamentaux ne sont pas des particules ponctuelles, mais des objets étendus, des cordes ou des branes.
2. Acceptation des hypothèses de base de la mécanique quantique telles qu'elles sont données.
3. La nécessité de la supersymétrie de la théorie.

La ceinture de protection :

- Différentes variantes de la théorie des cordes sont des formulations théoriques différentes, pas des théories différentes.
- Les dimensions compactes sont trop petites pour être observés avec la technologie actuelle.
- Expliquer les valeurs des constantes de la nature, en supposant un paysage des univers.

---

[770] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 202.

[771] Matsubara, « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ».

[772] Ian Hacking, « Representing and Intervening by Ian Hacking », Cambridge Core, octobre 1983, https://doi.org/10.1017/CBO9780511814563.

[773] Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?*

L'heuristique positive :

1. Expliquer la diversité des particules comme de simples manifestations d'un type fondamental d'objets.
2. Dériver les constantes de la nature
3. Unification du modèle standard avec gravité.

L'heuristique négative :

1. Aucun argument du *modus tollens* ne peut être dirigé contre le noyau dur.

Par rapport à d'autres programmes, la théorie des cordes semble être plus progressive dans un sens plus général. Et la distinction du programme progressif / dégénératif ne peut pas être faite, car les tests empiriques manquent. Mais les tentatives infructueuses des théoriciens sur une longue période pour déterminer les constantes de la nature à partir des principes de la théorie peuvent être considérées comme une phase dégénérative au sens de Lakatos, dans laquelle les constatations empiriques déterminent le développement théorique, même si dans ce cas les résultats empiriques étaient connus à l'avance, et pas prédit. La conclusion de Matsubara est que la théorie des cordes est un programme dégénératif, donc elle devrait être rejetée s'il y avait un programme rival aussi progressiste[774]. Malheureusement, à l'heure actuelle, les autres programmes de recherche sont au moins aussi peu concluants.

Concernant l'application de la méthodologie Lakatos à la théorie des cordes, Quine a déclaré :

> « Je crois que la théorie de Lakatos, MSRP, est l'analyse la plus raisonnable du développement scientifique ; il correspond à un assez grand nombre d'épisodes de l'histoire des sciences, et je pense qu'il établit le bon équilibre entre une compte descriptive et normative de la science. Il est également, dans une certaine mesure, utile pour discuter de la théorie des cordes et de ses concurrents, principalement la gravité quantique à boucles. Cependant, on ne peut pas vraiment dire qu'un programme [parmi ceux énumérés] est progressif et l'autre dégénératif, car la distinction et la comparaison sont faites en termes de développement théorique et empirique, et aucun développement empirique n'a eu lieu. D'un autre côté, sans utiliser les critères de Lakatos et au lieu de simplement s'appuyer sur notre notion quelque peu vague de développement, on est tenté de dire que la théorie des cordes était théoriquement progressive, mais pas empiriquement progressive. On pourrait dire que les adeptes de la théorie des cordes pensent que la progressivité théorique est suffisante pour continuer à travailler sur la théorie, tandis que les critiques pensent que ce n'est pas le cas. »[775]

Cartwright et Frigg sont parvenus à des conclusions similaires en analysant la théorie des cordes du point de vue de la méthodologie de Lakatos, en évaluant le degré de progressivité de la théorie

[774] Matsubara.

[775] W. V. Quine, *Ontological Relativity & Other Essays* (New York: Columbia University Press, 1969), 72.

selon : la gamme d'applications empiriques, les prédictions de succès, la reproduction de nouvelles technologies, la réponse aux problèmes, la cohérence, l'élégance, le pouvoir explicatif, la vérité. Leur conclusion était que la théorie des cordes était progressive en tant que pouvoir explicatif et unificateur, mais cela est insuffisant pour affirmer la progressivité de la théorie dans son ensemble. Mais les auteurs ne recommandent pas de rejeter la théorie, faisant appel à la tolérance méthodologique proposée par Lakatos. [776]

Reiner Hedrich déclare qu'actuellement la « théorie des cordes » n'est pas du tout une théorie, mais une structure labyrinthique de procédures et d'intuitions mathématiques. Ses seules motivations pour la gravité quantique à boucles sont l'incompatibilité mutuelle du modèle standard de la théorie des champs quantiques et de la relativité générale, et la métaphysique du programme d'unification physique[777]. Le report d'une décision philosophique sur la théorie des cordes après la consolidation du programme de recherche pourrait conduire à des conditions plus appropriées pour une évaluation.

Le grand atout de la théorie est l'espoir qu'elle réussira à unifier les deux théories apparemment incompatibles, la quantique et la relativité générale, et implicitement toutes les forces fondamentales, dans une grande théorie unifiée. De plus, la théorie était conforme à une approche considérée comme fondamentale dans la méthodologie scientifique par Einstein, Duhem et d'autres : la simplification. La théorie des cordes a unifié le modèle standard et la relativité générale, en ce sens étant un « meilleur » modèle même s'il ne fait toujours pas de prédictions[778]. Greene apprécie également son « élégance ». [779]

3.4.2. Anomalies de la théorie des cordes

Certaines des prédictions faites par les théoriciens des cordes, comme les trous noirs microscopiques et les particules super symétriques de faible énergie, ont été falsifiées par observation[780]. Mais ces problèmes ne réfutent pas la théorie, car ce sont des observations indirectes, plutôt que des résultats directs de la théorie.

---

[776] N. Cartwright et Roman Frigg, « String Theory Under Scrutiny » (2008), 14–15.

[777] Hedrich, « The Internal and External Problems of String Theory ».

[778] Hakon Enger, « String Theory and the Scientific Method », 2003, http://home.simula.no/~henger/publ/mnvit-essay.pdf.

[779] Brian Greene, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, 2nd ed. edition (New York London: W. W. Norton & Company, 2010), 137.

[780] Matthias Blau et Stefan Theisen, « String Theory as a Theory of Quantum Gravity: A Status Report », *General Relativity and Gravitation* 41, nº 4 (1 avril 2009): 743-55, https://doi.org/10.1007/s10714-008-0752-z.

Dans le cas de la théorie des cordes, les aspects expérimentaux dépassent notre capacité technologique[781]. Mais le fait que toutes les prédictions de la théorie aient jusqu'à présent été falsifiées est un problème. De plus, le problème du paysage est un autre problème qui rend la théorie non falsifiable. Pour résoudre ce problème, il a été proposé d'utiliser le principe anthropique, selon lequel nous pouvons choisir parmi différentes permutations les univers qui créent des conditions propices à l'apparition de la vie[782], mais ce principe est controversé[783]. Un autre problème concerne la matière noire et l'énergie noire, qui ne sont pas prédites par la théorie des cordes.

Alors que la théorie des cordes changeait de portée (et dans ce contexte, aussi toutes les exigences d'un programme de recherche, y compris la stratégie) de la physique des hadrons à la gravité quantique, des problèmes internes ont commencé à émerger qui, en essayant de les éliminer avec des hypothèses *ad hoc*, ils ont conduit à d'autres problèmes internes, entraînant une auto-référentialité croissante et une suppression simultanée de la phénoménologie. Son empirisme a baissé régulièrement, restant une structure mathématique labyrinthique d'une pertinence physique peu claire.

De plus, les développements théoriques ont conduit à une auto-immunisation de la théorie contre les vérifications empiriques, y compris dans le cas de la supersymétrie[784]. La théorie des cordes ne fait pas de prédictions pour les masses des particules supersymétriques ; ainsi, si de futures expériences sur des accélérateurs ne découvrent pas ces particules, on peut affirmer qu'elles ont des masses au-delà de la portée du dispositif expérimental[785]. Il est ainsi devenu que l'incapacité de faire des prévisions quantitatives est utilisée comme un avantage stratégique pour l'auto-immunisation, un aspect unique en physique. [786]

Dawid estime qu'une confirmation d'une théorie scientifique est basée sur trois facteurs principaux :

1. L'existence de solutions alternatives à un problème particulier (les théoriciens des cordes affirment que leur théorie est la seule option viable pour l'unification);
2. Le degré de connexion avec les théories déjà confirmées (les théoriciens des cordes considèrent leur programme comme une continuation naturelle du programme de recherche en physique des particules);

---

781 Richard P Feynman, « The Feynman Lectures on Physics », 2013, http://www.feynmanlectures.caltech.edu/.

782 Verhagen, « Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory ».

783 Lee Smolin, « A perspective on the landscape problem », *Foundations of Physics* 43, nº 1 (janvier 2013): 21-45, https://doi.org/10.1007/s10701-012-9652-x.

784 Richard Dawid, « On the Conflicting Assessments of the Current Status of String Theory », Preprint, avril 2008, 984-96, http://philsci-archive.pitt.edu/4009/.

785 Greene, *The Elegant Universe*.

786 Hedrich, « The Internal and External Problems of String Theory ».

3. Nombre d'intuitions / prédictions inattendues.

La confiance en théorie dépendrait du respect de ces facteurs, même en l'absence de confirmation empirique. Fondamentalement, Dawid suggère de passer d'une falsifiabilité empirique à un modèle bayésien qui définit la probabilité non pas « à quelle fréquence quelque chose se produit » mais « quel degré de confiance nous devrions avoir dans nos connaissances ».

Certains physiciens proposent d'évaluer des théories alternatives à la théorie des cordes. La principale différence serait que la théorie des cordes vise à résoudre le problème de la gravité quantique dans le contexte de l'unification. Malheureusement, de nombreux problèmes de la théorie des cordes restent dans les théories alternatives. Le principal rival, la gravité quantique à boucles, n'a pas encore été suffisamment développé pour faire des déclarations falsifiables. Smolin affirme que les alternatives ont été constamment négligées[787]. Le problème des alternatives est qu'à l'heure actuelle il n'existe pas une théorie suffisamment développée et consolidée pour remplacer la théorie des cordes[788]. À la recherche de « la théorie du tout », il ne semble pas y avoir d'autre moyen que de continuer à travailler sur la théorie des cordes (l'argument « Il n'y a pas d'alternative »). [789]

Un réaliste scientifique considérerait seulement une théorie mûre bien testée qui a prédit de nouveaux faits. La théorie des cordes ne répond pas à ces exigences. Les dualités de la théorie des cordes renforcent cette croyance. La sous-détermination des théories par les données est un problème qui concerne le réalisme scientifique. Les réalistes différencieront par la simplicité, le manque d'*ad hoc*, le pouvoir explicatif, etc., entre les théories. Alternativement, on peut soutenir que la sous-détermination implique seulement deux façons de décrire la même théorie. La sous-détermination devrait obliger le réaliste scientifique à abandonner le réalisme sémantique ou épistémique. [790]

Les positivistes logiques traditionnels sont en quelque sorte des anti-réalistes, considérant que la partie cognitive significative d'une théorie se limite à son contenu empirique. Ainsi, la théorie des cordes ne serait pas acceptée dans la situation actuelle. Si la théorie des cordes devait réussir empiriquement à l'avenir, les dualités ne seraient considérées que comme des équivalents sémantiques, car seul le contenu empirique serait considéré comme pertinent.

---

[787] Smolin, *The Trouble With Physics*.

[788] Joanes Lizarraga et al., « Fitting BICEP2 with defects, primordial gravitational waves and dust », *Journal of Physics: Conference Series* 600 (28 avril 2015): 600 (2015): 012025, https://doi.org/10.1088/1742-6596/600/1/012025.

[789] Richard Dawid, Stephan Hartmann, et Jan Sprenger, « The No Alternatives Argument », Preprint, 24 février 2013, 66.1 (2014): 213-234, http://philsci-archive.pitt.edu/9588/.

[790] Matsubara, « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ».

3.5 Autres théories de la gravité quantique

La **gravité bimétrique** est une classe de théories de la gravité modifiées dans lesquelles deux tenseurs métriques sont utilisés au lieu d'un[791], la deuxième métrique étant utilisée à des énergies élevées. Si les deux métriques interagissent, il existe deux types de gravitons, l'un massif et l'autre sans masse. L'ensemble des théories tente d'expliquer la gravité massive[792]. Ces théories sont celles de Nathan Rosen (1909-1995) [793] ou de Modified Newtonian Dynamics (MOND) de Mordehai Milgrom. Les évolutions de la gravité de masse ont encouragé l'émergence de nouvelles théories cohérentes de la gravité bimétrique[794], mais aucune ne refléte mieux les observations physiques que la théorie de la relativité générale[795]. Certaines de ces théories (MOND, par exemple) sont des alternatives à l'énergie sombre. D'autres théories bimétriques ne prennent pas en compte les gravitons massifs et ne modifient pas la loi de Newton, décrivant l'univers comme une variété de deux métriques riemanniennes couplées, où la matière interagit par gravité. Certains d'entre eux stipulent la vitesse variable de la lumière à haute densité d'énergie. [796]

La *bigravité de Rosen* (1940) [797] propose qu'à chaque point de l'espace-temps il existe un tenseur métrique euclidien en plus du tenseur métrique riemannien. Ainsi, à chaque point de l'espace-temps, il y a deux valeurs. Le premier tenseur métrique décrit la géométrie de l'espace-temps, et donc le champ gravitationnel. Le deuxième tenseur métrique fait référence à l'espace-temps plat et décrit les forces d'inertie. La bigravité de Rosen satisfait au principe de covariance et d'équivalence. La bigravité de Rosen et la relativité générale diffèrent dans le cas de la propagation des ondes électromagnétiques, du champ externe d'une étoile à haute densité et du comportement des ondes gravitationnelles intenses qui se propagent à travers un champ gravitationnel statique fort. Les

---

[791] N. Rosen, « General Relativity and Flat Space. I », *Physical Review* 57, nº 2 (15 janvier 1940): 57 (2): 147–150, https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.147.

[792] S. F. Hassan et Rachel A. Rosen, « Bimetric Gravity from Ghost-Free Massive Gravity », *Journal of High Energy Physics* 2012, nº 2 (24 février 2012): 1202 (2): 126, https://doi.org/10.1007/JHEP02(2012)126.

[793] Rosen, « General Relativity and Flat Space. I », 57 (2): 147–150.

[794] Lisa Zyga, « Gravitational Waves May Oscillate, Just like Neutrinos », 2017, https://phys.org/news/2017-09-gravitational-oscillate-neutrinos.html.

[795] Clifford Will, *The Renaissance of General Relativity, in The New Physics* (Cambridge: Cambridge University Press, 1992), 18.

[796] J. P. Petit et G. D'Agostini, « Cosmological bimetric model with interacting positive and negative masses and two different speeds of light, in agreement with the observed acceleration of the Universe », *Modern Physics Letters A* 29, nº 34 (27 octobre 2014): 29 (34): 1450182, https://doi.org/10.1142/S021773231450182X.

[797] Rosen, « General Relativity and Flat Space. I », 57 (2): 147–150.

prédictions du rayonnement gravitationnel de la théorie de Rosennu ont été réfutées par les observations du pulsar binaire Hulse-Taylor. [798]

La *bigravité massive* est apparue en 2010, développée par Claudia de Rham, Gregory Gabadadze et Andrew Tolley (dRGT) [799]. Une « métrique de référence » non dynamique apparaît dans la théorie dRGT. La valeur métrique de référence doit être spécifiée manuellement. Une nouvelle extension a été introduite par Fawad Hassan et Rachel Rosen. [800]

La **gravité quantique bohmienne** incorpore la configuration réelle en théorie comme variable de base et stipule qu'elle évolue de manière naturelle suggérée par la symétrie et l'équation de Schrodinger[801]. La théorie résout le problème du temps (le même rôle que dans TGR), et en partie le problème du difféomorphisme. Il n'a aucun problème avec le rôle des observateurs et des observanles car ils ne jouent aucun rôle dans cette théorie. La fonction d'onde dépendante du temps, qui satisfait l'équation de Schrodinger, n'est pas nécessaire ici.

La gravité quantique bohème implique une transition simple de la mécanique quantique, incorporant la configuration réelle dans la théorie comme variable de base et stipulant qu'elle évolue de manière naturelle suggérée par la symétrie et l'équation de Schrodinger.

3.6 Unification (la théorie finale)

Les domaines d'applicabilité de la relativité générale (RG) et de la théorie quantique des champs (TCC) sont différents, de sorte que la plupart des situations nécessitent l'utilisation d'une seule des deux théories[802]. Les chevauchements se produisent dans des régions de très petite dimensions et de masse élevée, comme le trou noir ou le premier univers (immédiatement après le Big Bang). Ce conflit est censé être résolu uniquement en unifiant la gravité avec les trois autres interactions, afin d'intégrer RG et TCC dans une seule théorie. La théorie des cordes stipule qu'au début de l'univers (jusqu'à 10^{-43} secondes après le Big Bang), les quatre forces fondamentales étaient une seule force fondamentale. Selon le physicalisme en philosophie, une théorie finale (TF) physique coïncidera avec une théorie philosophique finale.

---

[798] Will, *The Renaissance of General Relativity, in The New Physics*, 18.

[799] Claudia de Rham, Gregory Gabadadze, et Andrew J. Tolley, « Resummation of Massive Gravity », *Physical Review Letters* 106, nº 23 (10 juin 2011): 106 (23): 231101, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.231101.

[800] Hassan et Rosen, « Bimetric Gravity from Ghost-Free Massive Gravity », 1202 (2): 126.

[801] Sheldon Goldstein et Stefan Teufel, « Quantum spacetime without observers: ontological clarity and the conceptual foundations of quantum gravity », *arXiv:quant-ph/9902018*, 5 février 1999, http://arxiv.org/abs/quant-ph/9902018.

[802] Carlip, « Quantum Gravity », 64 (8): 885–942.

Plusieurs théories unificatrices ont été proposées. Une grande unification implique l'existence d'une force électronucléaire. La dernière étape de l'unification nécessiterait une théorie qui inclue à la fois la mécanique quantique et la gravité par la relativité générale (« la théorie finale »). Après 1990, certains physiciens considèrent que la théorie M à 11 dimensions, souvent identifiée à l'une des cinq théories des supercordes perturbateurs, ou parfois à la supergravité à supersymétrie maximale supersymétrique à 11 dimensions, est la théorie finale. L'idée de la théorie M[803] s'inspire des idées de la théorie de Kaluza-Klein, dans laquelle il a été constaté que l'utilisation d'un espace-temps à 5 dimensions pour la relativité générale (une des dimensions étant petite) est vue, du point de vue à 4 dimensions, comme la relativité générale habituelle avec l'électrodynamique de Maxwell. Une propriété importante de la théorie des cordes est sa supersymétrie (version de la théorie des supercodes) qui, avec les dimensions supplémentaires, sont les deux principales propositions pour résoudre le problème. Les dimensions supplémentaires permettraient à la gravité de se propager aux autres dimensions, les autres forces restant limitées dans un espace-temps à 4 dimensions.

Les tentatives d'utilisation de la gravité quantique à boucle (GCB) dans une TF ont échoué, mais les partisans de ce programme poursuivent leurs recherches. [804]

Il y a des tentatives pour développer une théorie finale à travers d'autres théories, telles que la théorie causale des systèmes de fermions, qui contient les deux théories physiques actuelles (la relativité générale et la théorie des champs quantiques) comme cas limites. Une autre théorie est celle des ensembles causaux. Une autre proposition est l'E8 de Garrett Lisi, qui propose l'unification au sein du groupe Lie[805]. Le modèle Strand de Christoph Schiller tente de refléter la symétrie jauge du modèle standard de la physique des particules, et une autre version implique ER=EPR, une conjecture en physique proposant que les particules intriquées soient connectées au travers d'un trou de ver, qui prétend que les particules inséparables sont liées par un trou de ver (ou pont Einstein-Rosen). [806]

---

[803] Weinberg, *Dreams Of A Final Theory*.

[804] Sundance Bilson-Thompson et al., « Particle Identifications from Symmetries of Braided Ribbon Network Invariants », *arXiv:0804.0037 [hep-th]*, 1 avril 2008, http://arxiv.org/abs/0804.0037.

[805] A. Garrett Lisi, « An Exceptionally Simple Theory of Everything », *arXiv:0711.0770 [gr-qc, physics:hep-th]*, 6 novembre 2007, http://arxiv.org/abs/0711.0770.

[806] Ron Cowen, « The Quantum Source of Space-Time », *Nature News* 527, nº 7578 (19 novembre 2015): 527 (7578): 290–293, https://doi.org/10.1038/527290a.

Jürgen Schmidhuber est pour la TF, déclarant que les théorèmes d'incomplétude de Gödel[807] ne sont pas pertinents pour la physique computationnelle[808]. La plupart des physiciens soutiennent que le théorème de Gödel n'implique pas l'impossibilité d'une TF[809]. Certains physiciens, dont Einstein, estiment que les modèles théoriques ne doivent pas être confondus avec la vraie nature de la réalité et soutiennent que les approximations n'arriveront jamais à une description complète de la réalité[810]. Un débat philosophique porte sur la question de savoir si une théorie finale peut être appelée la *loi fondamentale de l'univers*[811]. Les partisans réductionnistes de la TF affirment que la théorie est la loi fondamentale. Un autre point de vue est que les lois émergentes (comme la deuxième loi de la thermodynamique et la théorie de la sélection naturelle) doivent être considérées comme fondamentales, et donc indépendantes.

Le nom de « théorie finale » est contredit par la nature probabiliste des prévisions de mécanique quantique, la sensibilité aux conditions initiales, les limitations dues aux horizons d'événements et d'autres difficultés déterministes. Frank Close contredit l'idée de TF affirmant que les couches de la nature sont comme les couches d'oignon, et le nombre de ces couches pourrait être infini[812], impliquant une série infinie de théories physiques. Weinberg[813] déclare qu'étant donné qu'il est impossible de calculer avec précision même un vrai projectile dans l'atmosphère terrestre, nous ne pouvons pas parler de TF.

L'unification n'implique pas nécessairement la réduction. La théorie quantique des champs et la relativité générale sont elles-mêmes des théories unifiées. La relativité générale est une généralisation gravitationnelle de la théorie spéciale de la relativité qui unifie l'électromagnétisme avec la mécanique classique non gravitationnelle, et la théorie des champs quantiques est une combinaison de relativité restreinte et de mécanique quantique. Le modèle standard est souvent

---

[807] Les théorèmes d'incomplétude de Gödel sont deux théorèmes de la logique mathématique qui établissent les limitations inhérentes à tous les systèmes axiomatiques, à l'exception des plus triviaux, capables d'arithmétique. Le premier théorème déclare que toute théorie effectivement générée, capable d'exprimer l'arithmétique élémentaire, ne peut être à la fois cohérente et complète.

[808] Jürgen Schmidhuber, « A Computer Scientist's View of Life, the Universe, and Everything. Lecture Notes in Computer Science », 1997, 201–208, http://people.idsia.ch/~juergen/everything/.

[809] Jürgen Schmidhuber, « Hierarchies of generalized kolmogorov complexities and nonenumerable universal measures computable in the limit », *International Journal of Foundations of Computer Science* 13, nº 04 (1 août 2002): 13 (4): 587–612, https://doi.org/10.1142/S0129054102001291.

[810] Pais, *Subtle Is the Lord*, chap. 17.

[811] Weinberg, *Dreams Of A Final Theory*.

[812] Frank Close, *The New Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe*, Revised edition (New York: CRC Press, 2006).

[813] Weinberg, *Dreams Of A Final Theory*.

présenté comme un exemple d'unification réussie. Dans la tentative d'unifier la gravité avec les autres forces, la gravité quantique à boucles est une version « minimaliste » (c'est juste une tentative de quantifier la relativité générale). La théorie des cordes essaie d'être « la théorie du tout », dans laquelle un seul type d'interaction détermine tous les autres aspects de la réalité.

Entre la théorie quantique et la relativité générale, il existe des problèmes de compatibilité conceptuelle dans le développement de la gravité quantique: l'indépendance de fond de la relativité générale en raison de l'absence d'un cadre de référence préféré, s'oppose à la géométrie de la théorie quantique qui implique une dépendance de fond à l'existence d'un cadre de référence préféré[814]. La métrique en relativité générale détermine la géométrie de l'espace-temps et agit comme un potentiel. Parce qu'il s'agit d'une variable dynamique, il s'avère que la géométrie elle-même est dynamique. La théorie quantique nécessite une géométrie fixe, résultant en un traitement très différent de l'espace-temps par rapport à la GR. Une théorie de la gravité quantique peut abandonner la dépendance de fond, ou la théorie quantique peut être modifiée.

Selon Reiner Hedrich, la théorie des cordes est une construction mathématique sans aucun contrôle empirique, qui semble transcender de plus en plus le contexte de la physique, en augmentant l'auto-immunisation, devenant finalement une forme métaphysique de la nature de l'inspiration mathématique[815]. Le retour à un caractère métaphysique doit être vu comme une étape rétrograde. La théorie des cordes peut être comprise comme un retour à l'idéal ancien d'un approfondissement de la nature exclusivement par notre intellect (mathématique), sans observations ni dispositifs expérimentaux. Jeremy Butterfield et Christopher Isham soulignent que l'immense autoréférence dans toutes les théories de la gravité quantique est une conséquence de l'absence de données empiriques, de la signification métaphysique des hypothèses et des prédispositions, et de l'appareil mathématique et du modèle théorique sur lesquels ces théories sont conçues. [816]

La base mathématique de la théorie des cordes (une version étendue de l'appareil de la théorie quantique des champs) n'a pas changé de manière significative au cours de son évolution. Il y a eu des tentatives d'unifier la gravité avec d'autres forces sur des bases mathématiques, telles que les théories d'Einstein, Schrodinger, Misner et Wheeler sur l'unification géométrique de la gravité et de l'électromagnétisme, mais elles ont échoué[817]. Tous les chercheurs, qu'ils soient partisans ou critiques de la théorie finale, tentent de trouver une réponse à la question de savoir pourquoi cette unification n'a pas réussi jusqu'à présent. Après tout, il n'y a même pas de consensus sur la définition de ce qu'est réellement l'unification et dans quelle mesure elle peut refléter épistémiquement cette

[814] Weinstein, « Absolute Quantum Mechanics », 52: 67-73.

[815] Hedrich, « The Internal and External Problems of String Theory ».

[816] Butterfield et Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity », 33-89.

[817] Robert Weingard, « A Philosopher Looks at String Theory », *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1988 (1988): 95-106.

éventuelle unité ontique. Nos limites épistémiques pourraient rendre une telle exploration impossible.

Pratiquement, les philosophes des sciences sont sceptiques quant aux motivations philosophiques de cette unité et à son succès scientifique. [818]

[818] Nancy Cartwright, *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science* (Cambridge University Press, 1999).

4. Cosmologie

Au niveau cosmologique, le modèle cosmologique standard contient la théorie de la gravité d'Einstein comme faisant partie du « noyau dur ». La matière noire, l'énergie noire et l'inflation ont été ajoutées à la théorie en réponse aux observations. Aucune de ces hypothèses accessoires n'a encore été confirmée. Le modèle cosmologique standard n'a pas de prédictions de succès, il est constamment ajusté suite aux observations. La reproduction du spectre des fluctuations de température dans l'environnement cosmique avec micro-ondes est considérée comme un succès du modèle, mais elle a été obtenue par la modification forcée des paramètres du modèle, avec des incohérences avec les valeurs déterminées par d'autres moyens plus directs.

David Merritt[819] attire l'attention sur un programme de recherche alternatif, qui a été lancé au début des années 80 et a fait de nouvelles prédictions ; le programme de Mordehai Milgrom (MOND), initié en 1983, dont le principe spécifique stipule que les lois de la gravité et du mouvement diffèrent de celles de Newton ou Einstein dans le régime d'accélération très faible (au niveau des galaxies). Le programme a une longue liste d'autres prédictions, en évitant les hypothèses de matière noire et d'énergie noire.

En cosmologie, la métaphysique implique un large éventail de questions au-delà des preuves empiriques, utilisant parfois l'inférence spéculative. L'analyse épistémologique en cosmologie aide à modéliser l'évaluation. L'étude philosophique offre un cadre général pour interpréter des inférences qui vont au-delà de la science. [820]

En cosmologie, il existe des principes ontologiques qui aident à classer les modèles selon leurs caractéristiques, à concevoir la réalité cosmique dans une description plus transparente, et nous permettent de résoudre des équations mathématiques en tant que constructions centrales de tout modèle. Ces principes sont : [821]

a. Homogénéité de l'espace (répartition uniforme de la matière)
b. Homogénéité du temps (structure indépendante du temps cosmique mondial)
c. Isotropie de l'espace (indépendance de la structure par rapport à la direction d'observation)
d. Homotétie de l'espace (indépendance de la structure vis-à-vis des transformations scalaires)

---

[819] David Merritt, « Gravity: The Popper Problem », IAI TV - Changing how the world thinks, 2 octobre 2017, https://iai.tv/articles/gravity-the-popper-problem-auid-899.

[820] Petar V. Grujic, « Some epistemic questions of cosmology », *arXiv:0709.3191 [physics]*, 20 septembre 2007, http://arxiv.org/abs/0709.3191.

[821] Grujic.

Ainsi, le modèle standard (Hot Big Bang) comprend les modèles (a, c), le modèle stationnaire comprend (a, b, c), le modèle hiérarchique comprend (c, d)

Pour évaluer épistémiquement les modèles cosmologiques, nous supposons que les lois physiques sont valables et les mêmes partout dans le cosmos, dans l'espace et dans le temps. L'isotropie de l'espace est la seule propriété du cosmos facile à vérifier. Parce que l'inférence sur les propriétés physiques et les phénomènes est toujours indirecte et liée aux modèles théoriques, les preuves empiriques sont basées sur la validité de ces constructions théoriques. [822] Pour estimer les distances cosmiques, nous considérons le changement de couleur des raies spectrales de ces objets et nous nous appuyons sur l'interprétation de ce changement, attribué à l'effet Doppler (cinématique), aux phénomènes gravitationnels (dynamique), à l'expansion spatiale (géométrique), etc., selon nôtre modèle de l'univers. Dans « l'espace épistémique », les principes ontologiquement définis (a, b, c) sont postulés, mais le quatrième (d) n'est plus valable à des échelles suffisamment petites, y compris probablement gravitationnel. Une partie du cosmos observable, la cosmographie, peut être considérée comme une structure construite sur des composants élémentaires particuliers.

Les modèles cosmographiques commencent avec la galaxie comme unité élémentaire. La cosmologie traite les galaxies comme des points physiques, dotés de mouvements collectifs (cohérents) et propres (chaotiques).

En cosmologie, les prédictions ou descriptions théoriques doivent être en accord avec les preuves empiriques, il s'avère que les modèles seront adaptés aux nouvelles situations empiriques, ou de nouveaux éléments externes pourront être introduits dans le modèle, à condition qu'ils ne contredisent pas la structure initiale. [823]

La pierre d'essai d'un modèle cosmologique est de savoir comment il traite le problème du Commencement, y compris les conditions initiales et le problème eschatologique. L'approche abderienne est à l'abri de ces problèmes. En général, une bonne théorie comprend un modèle mathématique formel et la procédure de couplage avec la réalité physique. Hawking a proposé une solution qui vise à formuler un modèle autosuffisant.

Ainsi, le programme de recherche du modèle cosmologique standard est un programme unificateur au sens de la méthodologie des programmes de recherche de Lakatos, comprenant plusieurs programmes unifiés (tels que le Big Bang, l'évolution des étoiles et des galaxies, les singularités gravitationnelles, etc.). Ces programmes unifiés sont à la fois des sous-programmes de recherche du programme unificateur car, même s'ils sont créés et développés sans être requis par le

[822] Grujic.

[823] P. Duhem, « La Théorie Physique, Son Objet Et Sa Structure », *Revue Philosophique de la France Et de l'Etranger* 61 (1906): 324–327.

programme unificateur, ils doivent tenir compte de ses exigences pour être validés et inclus dans celui-ci.

La relativité générale est apparue comme un modèle extrêmement réussi pour la gravité et la cosmologie, qui a jusqu'à présent réussi de nombreux tests d'observation et d'expérimentation sans équivoque. Cependant, il y a de fortes indications que la théorie est incomplète[824]. La question de la gravité quantique et la question de la réalité des singularités espace-temps restent ouvertes. Les données d'observation qui sont considérées comme des preuves de l'énergie noire et de la matière noire pourraient indiquer la nécessité d'une nouvelle physique. Quoi qu'il en soit, la relativité générale est riche en possibilités d'exploration future. Les relativistes mathématiques cherchent à comprendre la nature des singularités et les propriétés fondamentales des équations d'Einstein[825], tandis que les relativistes numériques exécutent des simulations informatiques de plus en plus puissantes (comme celles qui décrivent la fusion des trous noirs). Un siècle après son introduction, la relativité générale reste un domaine de recherche très actif.

---

[824] John Maddox, *What Remains to Be Discovered: Mapping the Secrets of the Universe, the Origins of Life, and the Future of the Human Race*, 1st Touchstone Ed edition (New York: Free Press, 1999), 52–59, 98–122.

[825] H. Friedrich, « Is General Relativity 'Essentially Understood'? », *Annalen Der Physik* 15, nº 1-2 (2006): 15 (1–2): 84–108, https://doi.org/10.1002/andp.200510173.

Conclusions

À travers cet article, j'ai développé la reconstruction rationnelle de la gravité sur la base de la méthodologie du programme de recherche Lakatos, de Newton à nos jours, en mettant en évidence les principales méthodologies utilisées dans l'évolution de ce concept et les tendances de développement actuelles. L'extension naturelle que j'ai proposée pour la méthodologie de Lakatos peut expliquer avec succès les nouvelles évolutions de la physique dans le cas de la gravité quantique.

Lorsque les scientifiques formulent et développent de nouvelles théories, ils n'ont pas une compréhension immédiate du formalisme de la théorie. La description est approximative et la référence de leurs termes peut être vague[826]. Les images développées par une théorie ont une valeur heuristique importante, qui peut suggérer des extensions possibles de la théorie ou inspirer de nouvelles hypothèses. Une analyse critique philosophique de l'histoire du concept de gravité peut aider à mieux comprendre l'évolution de la science, comment aborder ce concept au fil du temps et les tendances et possibilités actuelles.

De l'avis de Lakatos, il existe plusieurs façons de reconstruire l'histoire, tout dépend de ce qui est considéré comme rationnel. Il propose que l'évaluation de ces théories se fasse en fonction de leur capacité à reconstruire l'histoire de la science tout en conservant la rationalité de la « grande science » : « Toutes les méthodologies fonctionnent comme des théories historiographiques (méta-historiques), respectivement des programmes de recherche, dont le pouvoir explicatif dépend de la reconstruction historique rationnelle qu'il propose. Ainsi, les programmes de recherche sont des critères normatifs de rationalité scientifique. » [827]

L'empirisme standard, qui fait partie de la méthodologie des programmes de recherche de Lakatos, stipule qu'en science, toutes les théories doivent être évaluées de manière impartiale en termes de preuves, de simplicité, d'unité ou de pouvoir explicatif. Certaines versions de l'empirisme standard accordent à la simplicité et au pouvoir explicatif un rôle plus important que d'autres versions. Planck a fait remarquer à un moment donné que : « Les expériences sont le seul moyen de connaissance à notre disposition. Le reste est de la poésie[828], de l'imagination », et Poincaré a déclaré que « L'expérience est la seule source de vérité. Lui seul peut nous enseigner quelque chose de nouveau ; le seul qui puisse nous donner la certitude. » [829]

---

[826] Matsubara, « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ».

[827] Sfetcu, « Reconstructia Rationala a Stiintei Prin Programe de Cercetare ».

[828] Peter W. Atkins et Ronald S. Friedman, *Molecular Quantum Mechanics*, 5 edition (Oxford ; New York: Oxford University Press, 2010), xiv.

[829] Henri Poincare, *Science and Hypothesis* (CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012), 140.

Lakatos, selon Larry Laudan, déclare que le méthodologiste ne peut pas dire aux scientifiques quelles théories rejeter ou accepter, abandonnant la force normative de la méthodologie[830]. Mais, dit Laudan, il ne faut pas abandonner l'entreprise méthodologique. La doctrine adoptée par Lakatos est celle de la rationalité, selon laquelle la plupart des scientifiques ont rationnellement fait des choix théoriques: « Si nous proposons une théorie pour résoudre une contradiction entre une théorie antérieure et une contre-exemplification, de sorte que la nouvelle théorie, à la place pour fournir une *explication* (scientifique) croissante du contenu, il n'offre qu'une *réinterprétation* du contenu décroissant (linguistique) la contradiction est résolue de manière sémantique, non scientifique. *Un certain fait n'est expliqué scientifiquement que si un nouveau fait est expliqué en plus avec lui.* » [831]

Keizo Matsubara conclut que « s'il est possible de trouver des dualités entre des formulations apparemment très différentes au sein d'un programme de recherche, nous devons reconnaître qu'il peut ne pas être approprié d'étudier un seul programme de recherche. L'hostilité qui a surgi de temps en temps entre les partisans des divers programmes de recherche en gravité quantique pourrait être une grave erreur. Si une sorte de dualité était trouvée entre les programmes de recherche, alors ils pourraient être unifiés. Une suggestion méthodologique générale peut être donnée, que seulement si un programme de recherche est progressivement empirique, il serait rationnel de continuer. Lorsqu'un programme de recherche théorique ne produit pas de résultats empiriques, une perspective plus large doit être adoptée. » [832]

La prolifération sans précédent des théories de la gravité nécessite une approche méthodologique appropriée, qui permet aux relations logiques entre ces théories d'expliquer la motivation de leur émergence, leurs modalités de développement et d'évaluer les futures tendances de développement. À cet égard, je pense que la méthodologie de Lakatos dispose d'une flexibilité et d'une logique suffisantes pour répondre à toutes ces questions. L'extension que j'ai proposée au moyen de programmes bifurqués et programmes unificateurs permet l'explication au niveau méthodologique et à travers la rationalité scientifique de cette prolifération des théories post-einsteiniennes et de la gravité quantique.

Einstein peut être mieux compris du point de vue de ses conceptions sur la géométrie et la physique : la « géométrie axiomatique » doit être complétée par des déclarations sur le comportement des objets, ce qui est une science naturelle qu'Einstein appelle « la géométrie pratique » ; ainsi, les mesures de longueur représentent une géométrie pratique :

[830] Larry Laudan, « Progress or Rationality? The Prospects for Normative Naturalism », *American Philosophical Quarterly* 24, nº 1 (1987): 19–31.

[831] Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 34.

[832] Matsubara, « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ».

> « J'apprécie que cette vision de la géométrie soit d'une importance particulière, car sans elle je n'aurais pas eu à formuler la théorie de la relativité. Sans cela, la prochaine réflexion aurait été impossible ; dans un système de référence tournant par rapport à un système inertiel, les lois de la disposition des corps rigides ne correspondent pas aux règles de la géométrie euclidienne du fait de la contraction de Lorentz ; ainsi, si nous admettons les systèmes non inertiels sur un pied d'égalité, nous devons abandonner la géométrie euclidienne. Sans l'interprétation ci-dessus, elle n'aurait certainement pas atteint l'étape décisive de la transition vers les équations covariantes générales. » [833]

Pour Einstein, l'éther et l'espace et le temps absolu étaient inutiles ou inadéquats. Contrairement à Einstein, qui attribuait des propriétés ou des états à l'espace, les physiciens ds siècles 18 et 19 ne pouvaient pas concevoir cela, alors ils ont inventé l'éther pour reprendre ces attributs. Einstein a révolutionné les concepts d'espace, de temps et de matière, grâce à une approche relationnelle de la physique.

Toutes les lois physiques sont basées sur une certaine géométrie spatio-temporelle. En ce sens, il existe trois types fondamentaux de structures géométriques : la topologie, la connexion et la métrique. La topologie traite la proximité des points ou des événements, des limites, de la continuité, de la connexion et des concepts associés. La connexion est une prescription du transport parallèle des vecteurs (et tenseurs) le long des courbes, et donc de la comparaison des champs vectoriels en différents points pour former des dérivées (covariables) et des équations différentielles. La métrique attribue des produits intérieurs aux vecteurs, aux longueurs et, dans les théories relativistes, détermine la structure des cônes de lumière et les relations causales[834]. Dans la théorie d'Einstein, la connexion et la métrique - et les structures déterminées par elles, telles que la courbure - représentent le champ gravitationnel, ce qui fait qu'elle fait partie de la structure dynamique de la géométrie espace-temps.

Selon Clifford, la variation de la courbure de l'espace-temps détermine le mouvement de la matière, et donc la théorie de la relativité générale explique la gravité en termes de courbure géométrique de l'espace-temps[835] [836]. Luciano Boi déclare que du point de vue philosophique et scientifique, la découverte la plus importante d'Einstein est que le comportement du champ gravitationnel dépend de la nature de la géométrie qui caractérise l'espace-temps.

---

[833] Einstein, *Geometrie und Erfahrung*, 235.

[834] Luciano Boi, « Theories of Space-Time in Modern Physics », *Synthese* 139, nº 3 (2004): 429–489.

[835] Wheeler, « On the nature of quantum geometrodynamics ».

[836] Luciano Boi, *Le problème mathématique de l'espace : Une quête de l'intelligible*, 1995 ed. (Berlin ; New York: Springer, 1995).

Keizo Matsubara déclare que l'existence des dualités dans le contexte de la théorie des cordes ne peut être interprétée correctement que si certains aspects sémantiques sont clarifiés[837]. Les arguments sur la dualité des cordes semblent compatibles avec une certaine forme de réalisme structurel. Les théoriciens des cordes ne croient pas que les doubles descriptions donnent lieu à de réelles alternatives. Ils sont basés sur le pragmatisme. Ainsi, dans certaines situations, une description est meilleure qu'une autre. Mais cela est valable du point de vue des calculs. Les physiciens ne comprennent pas les dualités comme soutenant une vision dans laquelle tout, d'une formulation théorique, est considéré comme littéralement vrai, pas même une tentative. Bien que la plupart des physiciens comprennent des dualités similaires au réalisme structurel ontique, des opinions alternatives sont possibles.

Dans le cas des dualités de la théorie des cordes, elles nient le réalisme sémantique, mais dans d'autres situations les théoriciens des cordes ont opté pour une compréhension réaliste, comme dans le cas du « paysage » de la théorie des cordes, dans lequel apparaît l'idée d'un univers parallèle et réel. Ainsi, les théoriciens des cordes doivent trouver un équilibre entre réalisme et anti-réalisme dans leur attitude envers leurs constructions théoriques, acceptant souvent un réalisme intermédiaire, une version du réalisme structurel, plus spécifiquement le réalisme structurel ontique[838]. Avec cette idée, Dawid[839] convient également que les dualités peuvent saper une vision qui les prend au sérieux

Erik Curiel[840] a comparé la préférence actuelle pour la gravité quantique à celle du modèle méthodologique hypothétique-déductif du XVIIe siècle, alors qu'au lieu d'être analysé de manière critique, il a été choisi uniquement pour exprimer son enthousiasme pour ses possibilités futures. Il pense qu'une telle attitude nuit à la science.

On espère que dans un avenir pas trop lointain, les énergies générées par le Grand collisionneur de hadrons seront suffisantes pour tester des aspects de la gravité quantique, tels que les dimensions supplémentaires, la supersymétrie, le comportement microscopique des trous noirs, etc. Si la supersymétrie est vérifiée, cela pourrait être un « test crucial » pour réfuter ou préserver la théorie des cordes, mais pas pour la confirmer.

---

[837] Matsubara, « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ».

[838] Matsubara.

[839] Dawid, « Scientific Realism in the Age of String Theory ».

[840] Curiel, « Against the Excesses of Quantum Gravity ».

Sean Lorenz arrive à une conclusion simple sur la gravité quantique : « Nous ne savons tout simplement pas encore. » [841] Il pense que quantifier la théorie générale est faux. L'une des raisons serait l'espace-temps, qui en théorie des cordes défie la simplicité ontologique au profit de la cohérence mathématique.

Une théorie de la gravité quantique obtenue à partir de la théorie du champ quantique du modèle standard combinée à la théorie générale de la relativité est difficile à réaliser, notamment pour l'explication de certains aspects impliquant une gravité forte (univers primitif, singularités gravitationnelles). Curiel déclare que tant qu'il n'y a pas de résultats empiriques pour réfuter une théorie, elle reste viable[842], mais une théorie qui ne confirme pas à long terme perd empiriquement sa crédibilité.

Un autre problème concerne le problème dit de paysage, une vision largement débattue dans la théorie des cordes : de nombreuses constantes fondamentales de la nature sont le résultat de la manière dont les variétés Calabi-Yau[843] peuvent être pliées, avec plus de 10^{500} modèles standard différents avec des valeurs différentes. [844] [845] Ainsi, des expériences qui semblent contredire les prédictions de la théorie des cordes peuvent être rejetées comme une mauvaise permutation. Une solution proposée mais controversée est de réduire le nombre d'univers uniquement aux univers habitables, de cette façon les constantes fondamentales de l'univers étant le résultat du principe anthropique, plutôt que celles déduites de la théorie[846]. Le grand nombre de permutations rend les tests de toutes les versions irréalistes. Ainsi, la théorie des cordes s'est auto-immunisée contre les réfutations de telles expériences et est devenue considérée comme une pseudoscience par certains chercheurs.

Rosenfeld a été le premier à tenter de construire une théorie de la gravité quantique (en 1930), mais a ensuite abandonné en raison du manque de preuves expérimentales sur les effets quantiques de la gravité[847]. Rosenfeld a nié sa nécessité et a fait valoir que l'analogie entre le champ gravitationnel et le champ électromagnétique n'est pas convaincante, affirmant que « le besoin ultime de quantifier

---

[841] Sean Lorenz, « A Cautious Ontology of Spacetime in Quantum Gravity », ResearchGate, 2015, https://www.researchgate.net/publication/268296604_A_CAUTIOUS_ONTOLOGY_OF_SPACETIME_IN_QUANTUM_GRAVITY.

[842] Curiel, « Against the Excesses of Quantum Gravity ».

[843] Disalle, « Spacetime Theory as Physical Geometry ».

[844] Leonard Susskind, « Lecture Collection | Topics in String Theory (Winter 2011) », YouTube, 2011, http://www.youtube.com/playlist?list=PL3E633552E58EB230.

[845] Adams et al., « Things Fall Apart », 347.

[846] Smolin, *The Trouble With Physics*.

[847] L. Rosenfeld, « On quantization of fields », *Nuclear Physics* 40 (1 février 1963): 442-44, https://doi.org/10.1016/0029-5582(63)90279-7.

le champ électromagnétique (ou tout autre champ) ne peut être basé que sur l'expérience. » [848] Rosenfeld semble être d'accord avec le point de vue de Bohr sur l'unité de la physique, selon lequel la gravité quantique ne peut pas être une théorie finale qui résulte de la physique classique (et des phénomènes classiques).

Les sceptiques croient que la relativité générale (RG) et la théorie quantique des champs (TQC), bien qu'ils ne soient pas incompatibles dans un sens logique, sont fondamentalement incompatibles en tant que « théories incommensurables » [849], car « selon la RG, la gravité n'est tout simplement pas une force » [850]. Certains soupçonnent que seules les stratégies internes de la physique (par exemple, la généralisation inductive, l'élargissement de la portée d'une théorie des ensembles ou l'exploitation des capacités explicatives d'une théorie des ensembles) ne sont pas suffisantes pour soutenir de tels programmes. Mais les physiciens utilisent des arguments externes, par exemple un « dogme d'unification » [851] [852] [853], en utilisant des principes métaphysiques (par exemple, « l'unité de la nature »), des principes métathéoriques (par exemple, « l'économie de la pensée ») ou des principes épistémologiques (par exemple, l'unification pour elle-même, l'élimination du dualisme théorique), respectivement des raisons philosophiques. [854] [855] [856]

Certains chercheurs soutiennent que le théorème d'incomplétude de Gödel implique qu'il n'est pas possible de construire une theorie finale (TF), une idée également défendue par Stanley Jaki[857] et Freeman Dyson: « Le théorème de Gödel suppose que les mathématiques pures sont inépuisables, peu importe le nombre de problèmes que nous résolvons, il y aura toujours d'autres problèmes qui ne peuvent pas être résolus dans les règles existantes [...] En raison du théorème de Gödel, la physique est également inépuisable. Les lois de la physique sont un ensemble fini de règles et incluent des règles pour les mathématiques, donc le théorème de Gödel s'applique à elles. » [858]

---

[848] Rosenfeld, 443.

[849] Wuthrich, « To quantize or not to quantize », 778.

[850] Maudlin, « On the Unification of Physics », 129–144.

[851] Wuthrich, « To quantize or not to quantize », 777–788.

[852] Maudlin, « On the Unification of Physics », 129–144.

[853] James Mattingly, « Is Quantum Gravity Necessary? », in *The Universe of General Relativity*, éd. par A. J. Kox et Jean Eisenstaedt, Einstein Studies (Birkhäuser Boston, 2005), 327-38.

[854] Salimkhani, « Quantum Gravity ».

[855] Wuthrich, « To quantize or not to quantize », 777–788.

[856] Mattingly, « Is Quantum Gravity Necessary? », 327– 338.

[857] Stanley L. Jaki, *The Relevance of Physics*, First Edition edition (Chicago: University Of Chicago Press, 1966), 127–130.

[858] Freeman Dyson, « The World on a String », 13 mai 2004, https://www.nybooks.com/articles/2004/05/13/the-world-on-a-string/.

Stephen Hawking, bien qu'il ait d'abord cru en la TF, après avoir analysé le théorème de Gödel, a pensé : « Certaines personnes seront très déçues s'il n'y a pas de théorie suprême qui puisse être formulée comme un nombre fini de principes. J'appartenais à ce camp, mais j'ai changé d'avis. » [859]

Il y a aussi des scientifiques qui se demandent comment la relation entre la relativité générale et la théorie quantique pourrait être conçue si le champ gravitationnel n'est pas quantifié[860]. La « question de la question » est de savoir si un tel modèle serait pertinent (expérimental et observationnel). Rosenfeld[861] a fait valoir que dans un tel cas, il vaut mieux s'en tenir à la gravité semi-classique, qui combine une description classique du champ gravitationnel avec un traitement quantique de tous les autres champs de force et de matière. Dans ce cas, la gravité quantique ne serait plus nécessaire. Callender et Huggett commentent ceci :

> « Une autre position philosophique, ... pourrait faire valoir dans ce contexte que la relativité générale décrit certains aspects du monde, et la mécanique quantique d'autres aspects distincts, et ce serait tout. Selon cette conception, la physique (et en fait la science) n'a pas à proposer une seule théorie universelle qui englobe tous les phénomènes physiques. Nous ne débattrons pas ici de la justesse de ce point de vue, mais nous voudrions souligner que si la physique aspire à fournir une image complète du monde, comme c'est traditionnel, alors il doit y avoir une théorie quantique de la gravité [au sens général d'une connexion entre relativité générale et théorie quantique]. La raison simple est que la relativité générale et la mécanique quantique ne peuvent pas être toutes deux correctes [dans les mêmes domaines d'applicabilité]. » [862]

Ils affirment que les deux théories « ... ne peuvent pas être toutes les deux universelle dans le cadre, car la seconde affirme strictement que toute la matière est quantique, et la première ne décrit que les effets gravitationnels de la matière classique. » Avec tous les succès empiriques impressionnants de la théorie quantique, elle ne prédit pas que toute la matière est quantifiée, ce qui n'aboutit qu'à adopter une interprétation ontologique de la théorie quantique. De l'avis de Bohr, cette idée peut résister à la mesure dans laquelle les objets ne sont ni quantiques ni classiques (même si dans les cas une prédisposition particulière apparaît).

Un problème spécial en faveur du découplage des deux théories est le problème de la constante cosmologique : alors que la théorie du champ quantique prédit une valeur astronomique élevée (indiquant une courbure extrême de l'espace-temps), un observateur constatera que l'espace-temps

---

[859] Stephen Hawking, « Gödel and the End of Physics », 2003, https://www.caltech.edu/campus-life-events/master-calendar/stephen-hawking-goumldel-and-the-end-of-physics.

[860] Butterfield et Isham, « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity », 57.

[861] Rosenfeld, « On quantization of fields », 442-44.

[862] Callender et Huggett, *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*, 4.

est plat, ou presque plat. Le problème de la constante cosmologique est considéré par Weinberg[863] comme une « vraie crise » pour la physique fondamentale. Elle suggère que notre compréhension du lien entre la relativité générale et la théorie des champs quantiques est (jusqu'à présent) prématurée pour s'appuyer sur des extrapolations à haute énergie. [864]

Richard Dawid soutient que la théorie des cordes est un nouveau type de théorie scientifique qui va au-delà de la sphère actuelle de la science expérimentale. Il suggère que la physique subit des changements méta-paradigmatiques dans lesquels les théories modernes l'emportent bien avant les capacités expérimentales, et une nouvelle méthode scientifique est nécessaire pour établir la validité des théories. [865]

Mais il est possible que la physique à l'échelle de Planck soit finalement décrite avec succès par une théorie qui n'a aucun lien avec la théorie des cordes actuelle ou toute autre approche existante de la gravité quantique :

« [...] la nature est beaucoup plus folle à l'échelle de Planck que même les théoriciens des cordes auraient pu l'imaginer. » [866]

« ... il est peu probable qu'une théorie finale de la gravité quantique - si elle existe effectivement - montre comme l'une des théories candidates actuelles, que ce soit la théorie des cordes, la gravité canonique ou d'autres approches. » [867]

La révolution de la physique de la gravité reste incomplète. C'est un problème qui, s'il est résolu, changera fondamentalement notre façon de penser le monde.

---

[863] Steven Weinberg, « The cosmological constant problem », *Reviews of Modern Physics* 61, nº 1 (1 janvier 1989): 1-23, https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.1.

[864] Zinkernagel, « The Philosophy Behind Quantum Gravity ».

[865] Dawid, « On the Conflicting Assessments of the Current Status of String Theory », 984-96.

[866] G. ’t Hooft, « Dimensional Reduction in Quantum Gravity », *arXiv:gr-qc/9310026*, 19 octobre 1993, http://arxiv.org/abs/gr-qc/9310026.

[867] Weinstein et Rickles, « Quantum Gravity ».

Bibliographie

Abbott, B. P., The LIGO Scientific Collaboration, et the Virgo Collaboration. « Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger ». *Physical Review Letters* 116, nº 6 (11 février 2016): 061102. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102.

Abbott, B. P., LIGO Scientific and Virgo Collaborations, M. R. Abernathy, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, et al. « Tests of General Relativity with GW150914 ». *Physical Review Letters* 116, nº 22 (31 mai 2016): 221101. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.221101.

Abuter, R., A. Amorim, N. Anugu, M. Bauböck, M. Benisty, J. P. Berger, N. Blind, et al. « Detection of the Gravitational Redshift in the Orbit of the Star S2 near the Galactic Centre Massive Black Hole ». *Astronomy & Astrophysics* 615 (1 juillet 2018): L15. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833718.

Adams, A., X. Liu, J. McGreevy, A. Saltman, et E. Silverstein. « Things Fall Apart: Topology Change from Winding Tachyons ». *Journal of High Energy Physics* 2005, nº 10 (11 octobre 2005): 033-033. https://doi.org/10.1088/1126-6708/2005/10/033.

Adams, John Couch. « On the Perturbations of Uranus (1841-1846). | StJohns », 1846. https://www.joh.cam.ac.uk/w16-manuscripts-john-couch-adams-perturbations-uranus-1841-1846.

Ade, P. a. R., N. Aghanim, M. Arnaud, F. Arroja, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, et al. « Planck 2015 Results - XX. Constraints on Inflation ». *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octobre 2016): A20. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525898.

Ade, P. a. R., N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. J. Banday, et al. « Planck 2015 Results - XIII. Cosmological Parameters ». *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octobre 2016): A13. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525830.

Adler, R., etal, J. Ellis, J. Lopez, N. Mavromatos, et D. Nanopoulos. « Test of CPT Symmetry and Quantum Mechanics with Experimental data from CPLEAR ». *Physics Letters B* 364, nº 4 (décembre 1995): 239-45. https://doi.org/10.1016/0370-2693(95)01416-0.

Adunas, G. Z., E. Rodriguez-Milla, et D. V. Ahluwalia. « Probing Quantum Aspects of Gravity ». *Physics Letters B* 485, nº 1-3 (juillet 2000): 215-23. https://doi.org/10.1016/S0370-2693(00)00697-3.

Aiton, E. J. *Vortex Theory of Planetary Motions*. First Edition edition. London; New York: American Elsevier Publishing Co., Inc., 1972.

Akhmedov, Emil T., Stephen James Minter, Piero Nicolini, et Douglas Singleton. « Experimental Tests of Quantum Gravity and Exotic Quantum Field Theory Effects ». ResearchGate, 2014. https://www.researchgate.net/publication/274948108_Experimental_Tests_of_Quantum_Gravity_and_Exotic_Quantum_Field_Theory_Effects.

Alfaro, Jorge, Hugo A. Morales-Tecotl, et Luis F. Urrutia. « Quantum gravity corrections to neutrino propagation ». *Physical Review Letters* 84, nº 11 (13 mars 2000): 2318-21. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2318.

Alväger, T., F. J. M. Farley, J. Kjellman, et L. Wallin. « Test of the second postulate of special relativity in the GeV region ». *Physics Letters* 12, nº 3 (1 octobre 1964): 260-62. https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91095-9.

Amelino-Camelia, Giovanni. « Are we at the dawn of quantum-gravity phenomenology? » *arXiv:gr-qc/9910089*, 25 octobre 1999. http://arxiv.org/abs/gr-qc/9910089.

Ananthaswamy, Anil. « Swiss-Cheese Model of the Cosmos Is Full of Holes ». New Scientist, 2008. https://www.newscientist.com/article/mg20026783-800-swiss-cheese-model-of-the-cosmos-is-full-of-holes/.

Anderson, Warren G. « Black Hole Information Loss », 1996. http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/info_loss.html.

Archibald, Anne M., Nina V. Gusinskaia, Jason W. T. Hessels, Adam T. Deller, David L. Kaplan, Duncan R. Lorimer, Ryan S. Lynch, Scott M. Ransom, et Ingrid H. Stairs. « Universality of Free Fall from the Orbital Motion of a Pulsar in a Stellar Triple System ». *Nature* 559, nº 7712 (juillet 2018): 73. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0265-1.

Arkani-Hamed, Nima. « The Future of Fundamental Physics », 2012, 14.

Arnowitt, R., S. Deser, et C. W. Misner. « The Dynamics of General Relativity ». *General Relativity and Gravitation* 40, nº 9 (septembre 2008): 1997-2027. https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1.

Aron, Jacob. « Earth's Mantle Helps Hunt for Fifth Force of Nature ». New Scientist, 2013. https://www.newscientist.com/article/dn23202-earths-mantle-helps-hunt-for-fifth-force-of-nature/.

Ashby, Neil. « Relativity in the Global Positioning System ». *Living Reviews in Relativity* 6, nº 1 (28 janvier 2003): 1. https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1.

Ashtekar, Abhay. « Loop quantum gravity: four recent advances and a dozen frequently asked questions ». In *The Eleventh Marcel Grossmann Meeting*, 126-47. World Scientific Publishing Company, 2008. https://doi.org/10.1142/9789812834300_0008.

———. « New Variables for Classical and Quantum Gravity ». *Physical Review Letters* 57, nº 18 (3 novembre 1986): 2244-47. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.2244.

Ashtekar, Abhay, et Martin Bojowald. « Quantum geometry and the Schwarzschild singularity ». *Classical and Quantum Gravity* 23, nº 2 (21 janvier 2006): 391-411. https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/2/008.

Ashtekar, Abhay, Luca Bombelli, et Alejandro Corichi. « Semiclassical States for Constrained Systems ». *Physical Review D*, 2005. https://www.academia.edu/587754/Semiclassical_states_for_constrained_systems.

Ashtekar, Abhay, et Jerzy Lewandowski. « Background Independent Quantum Gravity: A Status Report ». *Classical and Quantum Gravity* 21, nº 15 (7 août 2004): R53-152. https://doi.org/10.1088/0264-9381/21/15/R01.

Atkins, Peter W., et Ronald S. Friedman. *Molecular Quantum Mechanics*. 5 edition. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2010.

Audretsch, Jürgen. « Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions ». *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, nº 2 (1 septembre 1981): 322-39. https://doi.org/10.1007/BF01801202.

Avgoustidis, A., G. Luzzi, C. J. A. P. Martins, et A. M. R. V. L. Monteiro. « Constraints on the CMB Temperature-Redshift Dependence from SZ and Distance Measurements ». *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, nº 02 (février 2012): 013–013. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/02/013.

Balbinot, Roberto, et Alessandro Fabbri. « Amplifying the Hawking signal in BECs ». *Advances in High Energy Physics* 2014 (2014): 1-8. https://doi.org/10.1155/2014/713574.

Ball, Philip. « Black Holes "Do Not Exist" ». *Nature*, 31 mars 2005, news050328-8. https://doi.org/10.1038/news050328-8.

Banks, T., W. Fischler, S. H. Shenker, et L. Susskind. « M theory as a matrix model: A conjecture ». *Physical Review D* 55, nº 8 (15 avril 1997): 5112-28. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.5112.

Barack, Leor, et Curt Cutler. « LISA capture sources: Approximate waveforms, signal-to-noise ratios, and parameter estimation accuracy ». *Physical Review D* 69, nº 8 (30 avril 2004): 082005. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.082005.

Barrett, John W., et Louis Crane. « Relativistic spin networks and quantum gravity ». *Journal of Mathematical Physics* 39, nº 6 (juin 1998): 3296-3302. https://doi.org/10.1063/1.532254.

Bartlett, D. F., et Dave Van Buren. « Equivalence of active and passive gravitational mass using the moon ». *Physical Review Letters* 57, nº 1 (7 juillet 1986): 21-24. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.21.

Becker, Katrin, Melanie Becker, et John H. Schwarz. *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2007.

Beisbart, Claus. « Can We Justifiably Assume the Cosmological Principle in Order to Break Model Underdetermination in Cosmology? » *Journal for General Philosophy of Science* 40, nº 2 (1 décembre 2009): 175-205. https://doi.org/10.1007/s10838-009-9098-9.

Bekenstein, J., et M. Milgrom. « Does the Missing Mass Problem Signal the Breakdown of Newtonian Gravity? » *The Astrophysical Journal* 286 (novembre 1984): 7-14. https://doi.org/10.1086/162570.

Bekenstein, Jacob D. « Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm ». *Physical Review D* 71, nº 6 (14 mars 2005): 069901. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.069901.

Bell, J. S. « On the Einstein Podolsky Rosen paradox ». *Physics Physique Fizika* 1, nº 3 (1 novembre 1964): 195-200. https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195.

Bernal, J. D. *Science in History J. D. Bernal*. 3rd edition. M.I.T Press, 1965.

Bertone, Gianfranco, Dan Hooper, et Joseph Silk. « Particle dark matter: evidence, candidates and constraints ». *Physics Reports* 405, nº 5 (1 janvier 2005): 279-390. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031.

Bertschinger, Edmund. « Cosmological Perturbation Theory and Structure Formation ». *arXiv:astro-ph/0101009*, 31 décembre 2000. http://arxiv.org/abs/astro-ph/0101009.

Bilson-Thompson, Sundance, Jonathan Hackett, Lou Kauffman, et Lee Smolin. « Particle Identifications from Symmetries of Braided Ribbon Network Invariants ». *arXiv:0804.0037 [hep-th]*, 1 avril 2008. http://arxiv.org/abs/0804.0037.

Birkhoff, George D. « Matter, Electricity and Gravitation in Flat Space-Time ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 29, nº 8 (1 août 1943): 231-39. https://doi.org/10.1073/pnas.29.8.231.

Bīrūnī, Muḥammad ibn Aḥmad. « Alberuni's India ». Text, 1910. http://www.columbia.edu/cu/lweb/digital/collections/cul/texts/ldpd_5949073_001/index.html.

Bize, S., S. A. Diddams, U. Tanaka, C. E. Tanner, W. H. Oskay, R. E. Drullinger, T. E. Parker, et al. « Testing the stability of fundamental constants with the 199Hg+ single-ion optical clock ». *Physical Review Letters* 90, nº 15 (18 avril 2003): 150802. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150802.

Blake, Chris, Shahab Joudaki, Catherine Heymans, Ami Choi, Thomas Erben, Joachim Harnois-Deraps, Hendrik Hildebrandt, et al. « RCSLenS: Testing Gravitational Physics through the Cross-Correlation of Weak Lensing and Large-Scale Structure ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, nº 3 (1 mars 2016): 2806-28. https://doi.org/10.1093/mnras/stv2875.

Blanchet, Luc, et Jerome Novak. « Testing MOND in the Solar System ». *arXiv:1105.5815 [astro-ph, physics:gr-qc]*, 29 mai 2011. http://arxiv.org/abs/1105.5815.
Blandford, R. D. « Astrophysical black holes. » In *Three Hundred Years of Gravitation*, 277-329, 1987. http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..277B.
Blau, Matthias, et Stefan Theisen. « String Theory as a Theory of Quantum Gravity: A Status Report ». *General Relativity and Gravitation* 41, nº 4 (1 avril 2009): 743-55. https://doi.org/10.1007/s10714-008-0752-z.
Bohm, David. *Quantum Theory*. Revised ed. edition. New York: Dover Publications, 1989.
Bohr, N. « Über die Serienspektra der Elemente ». *Zeitschrift für Physik* 2, nº 5 (1 octobre 1920): 423-69. https://doi.org/10.1007/BF01329978.
Boi, Luciano. *Le problème mathématique de l'espace : Une quête de l'intelligible*. 1995 ed. Berlin ; New York: Springer, 1995.
———. « Theories of Space-Time in Modern Physics ». *Synthese* 139, nº 3 (2004): 429–489.
Bollert, Karl. *Einstein's Relativitätstheorie und ihre Stellung im System der Gesamterfahrung*. T. Steinkopf, 1921.
Born, Max. *Einstein's Theory of Relativity*. Revised edition edition. New York: Dover Publications Inc., 1962.
Bouman, K. L., M. D. Johnson, D. Zoran, V. L. Fish, S. S. Doeleman, et W. T. Freeman. « Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction ». In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 913-22, 2016. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.105.
Bozza, Valerio. « Gravitational Lensing by Black Holes ». *General Relativity and Gravitation* 42, nº 9 (1 septembre 2010): 2269-2300. https://doi.org/10.1007/s10714-010-0988-2.
Brading, K. A., et T. A. Ryckman. « Hilbert's 'Foundations of Physics': Gravitation and electromagnetism within the axiomatic method ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39, nº 1 (1 janvier 2008): 102-53. https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2007.08.002.
Brading, Katherine, et Harvey R. Brown. « Symmetries and Noether's Theorems ». In *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, édité par Katherine A. Brading et Elena Castellani, 89. Cambridge University Press, 2003.
Brading, Katherine, Elena Castellani, et Nicholas Teh. « Symmetry and Symmetry Breaking ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/.
Braginsky, V. B., et V. I. Panov. « Verification of the equivalence of inertial and gravitational mass ». *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics* 34 (1972): 463-66. https://istina.msu.ru/publications/article/4687588/.
Braginsky, Vladimir B. « Experimental Gravitation (What Is Possible and What Is Interesting to Measure) ». *Classical and Quantum Gravity* 11, nº 6A (juin 1994): A1–A7. https://doi.org/10.1088/0264-9381/11/6A/001.
Brans, C., et R. H. Dicke. « Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation ». *Physical Review* 124, nº 3 (1 novembre 1961): 925-35. https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925.
Bridle, Sarah L., Ofer Lahav, Jeremiah P. Ostriker, et Paul J. Steinhardt. « Precision Cosmology? Not Just Yet . . . » *Science* 299, nº 5612 (7 mars 2003): 1532-33. https://doi.org/10.1126/science.1082158.
Brillet, A., et J. L. Hall. « Improved laser test of the isotropy of space ». *Physical Review Letters* 42 (1 février 1979): 549-52. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.42.549.

Broderick, Avery E., Abraham Loeb, et Ramesh Narayan. « The Event Horizon of Sagittarius A* ». *The Astrophysical Journal* 701, nº 2 (20 août 2009): 1357-66. https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/1357.

Bub, Jeffrey. *Interpreting the Quantum World*. 1st edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

Bucherer, A. H. « Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips ». *Annalen der Physik* 333 (1909): 513-36. https://doi.org/10.1002/andp.19093330305.

Buchert, Thomas. « Dark Energy from Structure: A Status Report ». *General Relativity and Gravitation* 40, nº 2 (1 février 2008): 467-527. https://doi.org/10.1007/s10714-007-0554-8.

Bunge, Mario. « The Revival of Causality ». In *La Philosophie Contemporaine / Contemporary Philosophy: Chroniques Nouvelles / A New Survey*, édité par Guttorm Fløistad, 133-55. International Institute of Philosophy / Institut International de Philosophie. Dordrecht: Springer Netherlands, 1982. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9940-0_6.

Butterfield, J., et C. J. Isham. « On the Emergence of Time in Quantum Gravity ». *arXiv:gr-qc/9901024*, 8 janvier 1999. http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901024.

Butterfield, Jeremy, et Chris Isham. « Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity ». In *Physics Meets Philosophy at the Panck Scale*. Cambridge University Press, 2001.

Callender, Craig, et Nick Huggett. *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity*. Cambridge University Press, 2001.

Cao, Tian Yu. « Prerequisites for a Consistent Framework of Quantum Gravity ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32, nº 2 (2001): 181–204.

Capelli, A. « The Birth of String Theory Edited by Andrea Cappelli ». Cambridge Core, avril 2012. https://doi.org/10.1017/CBO9780511977725.

Carlip, S. « Black Hole Thermodynamics and Statistical Mechanics ». In *Physics of Black Holes: A Guided Tour*, édité par Eleftherios Papantonopoulos, 89-123. Lecture Notes in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88460-6_3.

———. « Is Quantum Gravity Necessary? » *Classical and Quantum Gravity* 25, nº 15 (7 août 2008): 154010. https://doi.org/10.1088/0264-9381/25/15/154010.

———. « Quantum Gravity: a Progress Report ». *Reports on Progress in Physics* 64, nº 8 (1 août 2001): 885-942. https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301.

Carroll, Sean M. « The Cosmological Constant ». *Living Reviews in Relativity* 4, nº 1 (7 février 2001): 1. https://doi.org/10.12942/lrr-2001-1.

Cartwright, N., et Roman Frigg. « String Theory Under Scrutiny », 2008.

Cartwright, Nancy. *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge University Press, 1999.

Cassirer, Ernst. *Zur Einstein'schen relativitätstheorie: Erkenntnistheoretische betrachtungen*. B. Cassirer, 1921.

Cassirer, Ernst, W. C. Swabey, et M. C. Swabey. *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity*. Courier Corporation, 2003.

Castro, Alejandra, Alexander Maloney, et Andrew Strominger. « Hidden conformal symmetry of the Kerr black hole ». *Physical Review D* 82, nº 2 (13 juillet 2010): 024008. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.024008.

Caves, Carlton Morris. « Theoretical investigations of experimental gravitation ». Phd, California Institute of Technology, 1979. http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898.

Celotti, Annalisa, John C. Miller, et Dennis W. Sciama. « Astrophysical evidence for the existence of black holes ». *Classical and Quantum Gravity* 16, nº 12A (1 décembre 1999): A3-21. https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301.

Cervantes-Cota, Jorge L., Salvador Galindo-Uribarri, et George F. Smoot. « A Brief History of Gravitational Waves ». *Universe* 2, nº 3 (septembre 2016): 22. https://doi.org/10.3390/universe2030022.

Challis, James. *Notes on the Principles of Pure and Applied Calculation: And Applications of Mathematical Principles to Theories of the Physical Forces.* University of Michigan Library, 1869.

Chalmers, Alan F. *What Is This Thing Called Science?* 3 edition. Indianapolis: Hackett Publishing Co., 1999.

Chandrasekhar, Subrahmanyan. *The Mathematical Theory of Black Holes*. Clarendon Press, 1998.

Chen, Pisin, et Toshi Tajima. « Testing Unruh Radiation with Ultraintense Lasers ». *Physical Review Letters* 83, nº 2 (12 juillet 1999): 256-59. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.256.

Choi, Charles Q. « Black Hole Pretenders Could Really Be Bizarre Quantum Stars ». Scientific American, 2018. https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-pretenders-could-really-be-bizarre-quantum-stars/.

———. « Gravitational Waves Detected from Neutron-Star Crashes: The Discovery Explained ». Space.com, 2017. https://www.space.com/38471-gravitational-waves-neutron-star-crashes-discovery-explained.html.

Chow, Tai L. *Gravity, Black Holes, and the Very Early Universe: An Introduction to General Relativity and Cosmology*. Springer Science & Business Media, 2007.

Chown, Marcus. « Gravity May Venture Where Matter Fears to Tread ». New Scientist. Consulté le 3 mai 2019. https://www.newscientist.com/article/mg20126990-400-gravity-may-venture-where-matter-fears-to-tread/.

Cicoli, Michele, Francisco G. Pedro, et Gianmassimo Tasinato. « Natural Quintessence in String Theory ». *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, nº 07 (23 juillet 2012): 044-044. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/044.

Clarke, C. J. S. « The Analysis of Space-Time Singularities by C. J. S. Clarke ». Cambridge Core, mai 1994. https://doi.org/10.1017/CBO9780511608155.

Clifton, Timothy, Pedro G. Ferreira, Antonio Padilla, et Constantinos Skordis. « Modified Gravity and Cosmology ». *Physics Reports* 513, nº 1-3 (mars 2012): 1-189. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001.

Close, Frank. *The New Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe*. Revised edition. New York: CRC Press, 2006.

Cohen, I. Bernard. « Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents ». *Philosophy of Science* 27, nº 2 (1960): 209–211.

Cohen, I. Bernard, et George E. Smith. *The Cambridge Companion to Newton*. Cambridge University Press, 2006.

Colladay, Don, et Alan Kostelecky. « Lorentz-Violating Extension of the Standard Model ». *Physical Review D* 58, nº 11 (26 octobre 1998): 116002. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.58.116002.

Collett, Thomas E., Lindsay J. Oldham, Russell J. Smith, Matthew W. Auger, Kyle B. Westfall, David Bacon, Robert C. Nichol, Karen L. Masters, Kazuya Koyama, et Remco van den Bosch. « A Precise Extragalactic Test of General Relativity ». *Science* 360, nº 6395 (22 juin 2018): 1342-46. https://doi.org/10.1126/science.aao2469.

Collins, Harry M. *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*. Reprint edition. Chicago: University of Chicago Press, 1992.

Cornish, Neil, David Spergel, et Glenn Starkman. « Circles in the Sky: Finding Topology with the Microwave Background Radiation ». *Classical and Quantum Gravity* 15, nº 9 (1 septembre 1998): 2657-70. https://doi.org/10.1088/0264-9381/15/9/013.

Cowen, Ron. « The Quantum Source of Space-Time ». *Nature News* 527, nº 7578 (19 novembre 2015): 290. https://doi.org/10.1038/527290a.

Crupi, Vincenzo. « Confirmation », 30 mai 2013. https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/confirmation/.

Curiel, Erik. « Against the Excesses of Quantum Gravity: A Plea for Modesty ». *Proceedings of the Philosophy of Science Association* 2001, nº 3 (2001): S424-.

———. « Singularities and Black Holes ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Spring 2019. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019. https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/spacetime-singularities/.

———. « The Analysis of Singular Spacetimes ». *Philosophy of Science* 66, nº 3 (1999): 145.

Cutler, Curt, et Kip S. Thorne. « An Overview of Gravitational-Wave Sources ». *arXiv:gr-qc/0204090*, 30 avril 2002. http://arxiv.org/abs/gr-qc/0204090.

Dalal, Neal, Daniel E. Holz, Scott A. Hughes, et Bhuvnesh Jain. « Short GRB and binary black hole standard sirens as a probe of dark energy ». *Physical Review D* 74, nº 6 (18 septembre 2006): 063006. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.063006.

Damour, T. « The problem of motion in Newtonian and Einsteinian gravity. » In *Three Hundred Years of Gravitation*, 128-98, 1987. http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..128D.

Davies, P. C. W. « Thermodynamics of Black Holes ». *Reports on Progress in Physics* 41, nº 8 (août 1978): 1313–1355. https://doi.org/10.1088/0034-4885/41/8/004.

Dawid, Richard. « On the Conflicting Assessments of the Current Status of String Theory ». Preprint, avril 2008. http://philsci-archive.pitt.edu/4009/.

———. « Scientific Realism in the Age of String Theory ». *Physics and Philosophy*, 2007.

———. *String Theory and the Scientific Method*. 1 edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

Dawid, Richard, Stephan Hartmann, et Jan Sprenger. « The No Alternatives Argument ». Preprint, 24 février 2013. http://philsci-archive.pitt.edu/9588/.

De Lorenci, V. A., M. Faundez-Abans, et J. P. Pereira. « Testing the Newton second law in the regime of small accelerations ». *Astronomy & Astrophysics* 503, nº 1 (août 2009): L1-4. https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811520.

Deser, S. « Self-Interaction and Gauge Invariance ». *General Relativity and Gravitation* 1, nº 1 (1 mars 1970): 9-18. https://doi.org/10.1007/BF00759198.

DeWitt, B. S., et Louis Witten. *The Quantization of Geometry, in Gravitation an Introduction to Current Research*. First Edition edition. John Wiley & Sons, 1962.

DeWitt, Bryce S. « Definition of Commutators via the Uncertainty Principle ». *Journal of Mathematical Physics* 3 (1 juillet 1962): 619-24. https://doi.org/10.1063/1.1724265.

———. « Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory ». *Physical Review* 160, nº 5 (25 août 1967): 1113-48. https://doi.org/10.1103/PhysRev.160.1113.

DeWitt, C. *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*. Second Printing edition. Gordon & Breach, 1965.

Dicke, R. H. *Gravitation and the universe.*, 1969. http://adsabs.harvard.edu/abs/1969grun.book.....D.

Dirac, Paul A. M. *Lectures on Quantum Mechanics*. Mineola, NY: Snowball Publishing, 2012.

Disalle, Robert. « Spacetime Theory as Physical Geometry ». *Erkenntnis* 42, nº 3 (1995): 317–337.

Dittrich, B. « Partial and Complete Observables for Hamiltonian Constrained Systems ». *General Relativity and Gravitation* 39, nº 11 (1 novembre 2007): 1891-1927. https://doi.org/10.1007/s10714-007-0495-2.

Dowker, Fay, Jerome P. Gauntlett, David A. Kastor, et Jennie Traschen. « Pair Creation of Dilaton Black Holes ». *Physical Review D* 49, nº 6 (15 mars 1994): 2909-17. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.49.2909.

Drake, Stillman. *Galileo at Work: His Scientific Biography*. Courier Corporation, 2003.

Duff, Michael J. « The Theory Formerly Known as Strings ». *Scientific American* 278 (1 février 1998): 64-69. https://doi.org/10.1038/scientificamerican0298-64.

Duhem, P. « La Théorie Physique, Son Objet Et Sa Structure ». *Revue Philosophique de la France Et de l'Etranger* 61 (1906): 324–327.

Duhem, Pierre Maurice Marie, Jules Vuillemin, et Louis de Broglie. *The Aim and Structure of Physical Theory*. Traduit par Philip P. Wiener. 9932nd edition. Princeton: Princeton University Press, 1991.

Dyson, Freeman. « The World on a String », 13 mai 2004. https://www.nybooks.com/articles/2004/05/13/the-world-on-a-string/.

Earman, John. « Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes ». *British Journal for the Philosophy of Science* 49, nº 2 (1998): 338–347.

———. « Thoroughly Modern Mctaggart: Or, What Mctaggart Would Have Said If He Had Read the General Theory of Relativity ». *Philosophers' Imprint* 2 (2002): 1–28.

Easther, Richard, Brian R. Greene, William H. Kinney, et Gary Shiu. « Inflation as a Probe of Short Distance Physics ». *Physical Review D* 64, nº 10 (16 octobre 2001): 103502. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.103502.

Edwards, Matthew R., éd. *Pushing Gravity: New Perspectives on Le Sage's Theory of Gravitation*. Y First edition edition. Montreal: Apeiron, 2002.

Ehlers, J., P. Geren, et R. K. Sachs. « Isotropic Solutions of the Einstein-Liouville Equations ». *Journal of Mathematical Physics* 9, nº 9 (1 septembre 1968): 1344-49. https://doi.org/10.1063/1.1664720.

Einstein, A. « The foundation of the general theory of relativity ». In *The Principle of Relativity. Dover Books on Physics. June 1, 1952. 240 pages. 0486600815, p. 109-164*, 109-64, 1952. http://adsabs.harvard.edu/abs/1952prel.book..109E.

Einstein, A., B. Podolsky, et N. Rosen. « Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? » *Physical Review* 47, nº 10 (15 mai 1935): 777-80. https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777.

Einstein, A., et N. Rosen. « On Gravitational Waves ». *Journal of The Franklin Institute* 223 (1 janvier 1937): 43-54. https://doi.org/10.1016/S0016-0032(37)90583-0.

Einstein, Albert. « Autobiographische Skizze ». In *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, édité par Carl Seelig, 9-17. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956. https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2.

———. *Fundamental Ideas and Problems of the Theory of Relativity: Lecture Delivered to the Nordic Assembly of Naturalists at Göteborg on July 11, 1923*. Nobel Museum, 2009.

———. *Geometrie und Erfahrung: Erweiterte Fassung des Festvortrages Gehalten an der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 27. Januar 1921*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1921. https://www.springer.com/de/book/9783642499036.

———. « Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation ». *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), Seite 688-696.*, 1916. http://adsabs.harvard.edu/abs/1916SPAW.......688E.

———. *Teoria relativității: Relativitatea specială și relativitatea generală*. Nicolae Sfetcu, 2017. https://books.google.ro/books?id=aMtNDwAAQBAJ.

———. « The Meaning of Relativity ». Princeton University Press, 1921. https://press.princeton.edu/titles/484.html.

———. *The Principle of Relativity*. S.l.: BN Publishing, 2008.

———. *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*. 23. Aufl. 2001. Nachdruck. Berlin: Springer, 2002.

Einstein, Albert (Author). « Motive des Forschens. », 1918. http://alberteinstein.info/vufind1/Record/EAR000079148.

Ellis, G. F. R., et J. E. Baldwin. « On the Expected Anisotropy of Radio Source Counts ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 206, nº 2 (1 janvier 1984): 377-81. https://doi.org/10.1093/mnras/206.2.377.

Ellis, G. F. R., S. D. Nel, R. Maartens, W. R. Stoeger, et A. P. Whitman. « Ideal observational cosmology ». *Physics Reports* 124, nº 5 (1 juillet 1985): 315-417. https://doi.org/10.1016/0370-1573(85)90030-4.

Ellis, George F R. « Issues in the philosophy of cosmology ». In *Philosophy of Physics*, édité par Jeremy Butterfield et John Earman, 1183-1285. Handbook of the Philosophy of Science. Amsterdam: North-Holland, 2007. https://doi.org/10.1016/B978-044451560-5/50014-2.

Enger, Hakon. « String Theory and the Scientific Method », 2003. http://home.simula.no/~henger/publ/mnvit-essay.pdf.

Eötvös, Roland V., Desiderius Pekár, et Eugen Fekete. « Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität ». *Annalen der Physik* 373 (1922): 11-66. https://doi.org/10.1002/andp.19223730903.

Esfeld, Michael, et Vincent Lam. « Moderate Structural Realism About Space-Time ». *Synthese* 160, nº 1 (2008): 27–46.

Euler, Leonhard. *Briefe an eine deutsche Prinzessin, aus dem Französischen übersetzt*. Junius, 1773. https://books.google.ro/books?id=FaMAAAAAMAAJ.

———. *Sol et Luna I: Opera Mechanica Et Astronomica Vol 23*. Édité par Otto Fleckenstein. 1956 edition. Basileae: Birkhäuser, 1956.

Everitt, C. W. F., D. B. DeBra, B. W. Parkinson, J. P. Turneaure, J. W. Conklin, M. I. Heifetz, G. M. Keiser, et al. « Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity ». *Physical Review Letters* 106, nº 22 (31 mai 2011): 221101. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.221101.

Famaey, Benoit, et Stacy McGaugh. « Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions ». *Living Reviews in Relativity* 15, nº 1 (décembre 2012): 10. https://doi.org/10.12942/lrr-2012-10.

Faraoni, Valerio. « Illusions of general relativity in Brans-Dicke gravity ». *Physical Review D* 59, nº 8 (22 mars 1999): 084021. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.59.084021.

Farley, F. J. M., J. Bailey, R. C. A. Brown, M. Giesch, H. Jöstlein, S. van der Meer, E. Picasso, et M. Tannenbaum. « The Anomalous Magnetic Moment of the Negative Muon ». *Il Nuovo Cimento A (1965-1970)* 45, nº 1 (1 septembre 1966): 281-86. https://doi.org/10.1007/BF02738104.

Feldman, Richard. « Naturalized Epistemology », 5 juillet 2001. https://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/epistemology-naturalized/.

Ferrarese, Laura, et David Merritt. « A Fundamental Relation Between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies ». *The Astrophysical Journal* 539, nº 1 (10 août 2000): L9-12. https://doi.org/10.1086/312838.

Feyerabend, Paul. *Against Method*. London: New Left Books, 1975.

Feynman, Richard P. « The Feynman Lectures on Physics », 2013. http://www.feynmanlectures.caltech.edu/.

Feynman, Richard P, Fernando B Morinigo, William G Wagner, et Brian Hatfield. *Feynman Lectures on Gravitation*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.

Fine, Arthur. *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*. University of Chicago Press, 1986.

Fischbach, E., D. Sudarsky, A. Szafer, C. Talmadge, et S. H. Aronson. « Reanalysis of the Eotvos experiment ». *Physical Review Letters* 56 (1 janvier 1986): 3-6. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3.

Fischer, M., N. Kolachevsky, M. Zimmermann, R. Holzwarth, Th Udem, T. W. Haensch, M. Abgrall, et al. « New Limits to the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements ». *Physical Review Letters* 92, nº 23 (10 juin 2004): 230802. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.230802.

Fleischhack, Christian. « Irreducibility of the Weyl Algebra in Loop Quantum Gravity ». *Physical Review Letters* 97, nº 6 (11 août 2006): 061302. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.061302.

Fomalont, E. B., et S. M. Kopeikin. « The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results ». *The Astrophysical Journal* 598, nº 1 (20 novembre 2003): 704-11. https://doi.org/10.1086/378785.

Fomalont, E., S. Kopeikin, G. Lanyi, et J. Benson. « Progress in Measurements of the Gravitational Bending of Radio Waves Using the VLBA ». *The Astrophysical Journal* 699, nº 2 (10 juillet 2009): 1395-1402. https://doi.org/10.1088/0004-637X/699/2/1395.

Fomalont, Ed, Sergei Kopeikin, Dayton Jones, Mareki Honma, et Oleg Titov. « Recent VLBA/VERA/IVS Tests of General Relativity ». *Proceedings of the International Astronomical Union* 5, nº S261 (avril 2009): 291-95. https://doi.org/10.1017/S1743921309990536.

Font, José A. « Numerical Hydrodynamics in General Relativity ». *Living Reviews in Relativity* 6, nº 1 (19 août 2003): 4. https://doi.org/10.12942/lrr-2003-4.

Franklin, Allan. « Calibration ». In *Can That Be Right? Essays on Experiment, Evidence, and Science*, édité par Allan Franklin, 237-72. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5334-8_9.

———. *Shifting Standards: Experiments in Particle Physics in the Twentieth Century*. 1 edition. Pittsburgh, Pa: University of Pittsburgh Press, 2013.

Franklin, Allan, et Slobodan Perovic. « Experiment in Physics ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2016. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016. https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/physics-experiment/.

Fresnel, A. « Lettre a Francois Arago sur L'Influence du Mouvement Terrestre dans quelques Phenomenes Optiques, in Annales de chimie et de physique - 98 Years available - Gallica », 1818. https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343780820/date.r=Annales+de+chimie+et+de+physique.langEN.

Friedman, A. « On the Curvature of Space ». *General Relativity and Gravitation* 31, nº 12 (1 décembre 1999): 1991-2000. https://doi.org/10.1023/A:1026751225741.

Friedman, Michael. *Foundations of Space-Time Theories: Relativistic Physics and Philosophy of Science*. Princeton University Press, 1983.

———. « Geometry, Convention, and the Relativized A Priori: Reichenbach, Schlick, and Carnap ». Reconsidering Logical Positivism, juillet 1999. https://doi.org/10.1017/CBO9781139173193.006.

Friedrich, H. « Is General Relativity 'Essentially Understood'? » *Annalen Der Physik* 15, nº 1-2 (2006): 84-108. https://doi.org/10.1002/andp.200510173.

Fumagalli, Michele, John M. O'Meara, et J. Xavier Prochaska. « Detection of Pristine Gas Two Billion Years After the Big Bang ». *Science* 334, nº 6060 (2 décembre 2011): 1245-49. https://doi.org/10.1126/science.1213581.

Galison, Peter. « How Experiments End ». *Journal of Philosophy* 87, nº 2 (1990): 103–106.

———. *Laws of Nature: Essays on the Philosophic, Scientific, and Historical Dimensions*. Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1995.

Gambini, Rodolfo, et Jorge Pullin. « Quantum Gravity Experimental Physics? » *General Relativity and Gravitation* 31, nº 11 (1 novembre 1999): 1631-37. https://doi.org/10.1023/A:1026701930767.

Garay, L. J., J. R. Anglin, J. I. Cirac, et P. Zoller. « Sonic analog of gravitational black holes in Bose-Einstein condensates ». *Physical Review Letters* 85, nº 22 (27 novembre 2000): 4643-47. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.4643.

Georgi, H., et Paul Davies. *Grand Unified Theories, in The New Physics*. Cambridge University Press, 1992.

Geroch, Robert, Liang Can-bin, et Robert M. Wald. « Singular boundaries of space–times ». *Journal of Mathematical Physics* 23, nº 3 (1 mars 1982): 432-35. https://doi.org/10.1063/1.525365.

Ghirardi, G. C., A. Rimini, et T. Weber. « Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems ». *Physical Review D* 34, nº 2 (15 juillet 1986): 470-91. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470.

Gholson, Barry, et Peter Barker. « Kuhn, Lakatos, and Laudan: Applications in the history of physics and psychology ». *American Psychologist* 40, nº 7 (1985): 755-69. https://doi.org/10.1037/0003-066X.40.7.755.

Giddings, Steven B. « The black hole information paradox ». *arXiv:hep-th/9508151*, 28 août 1995. http://arxiv.org/abs/hep-th/9508151.

Gillessen, S., F. Eisenhauer, S. Trippe, T. Alexander, R. Genzel, F. Martins, et T. Ott. « Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center ». *The Astrophysical Journal* 692, nº 2 (20 février 2009): 1075-1109. https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075.

Giovanelli, Marco. « The Forgotten Tradition: How the Logical Empiricists Missed the Philosophical Significance of the Work of Riemann, Christoffel and Ricci ». *Erkenntnis* 78, nº 6 (1 décembre 2013): 1219-57. https://doi.org/10.1007/s10670-012-9407-2.

Gladders, Michael D., H. K. C. Yee, Subhabrata Majumdar, L. Felipe Barrientos, Henk Hoekstra, Patrick B. Hall, et Leopoldo Infante. « Cosmological Constraints from the Red-Sequence Cluster Survey ». *The Astrophysical Journal* 655, nº 1 (janvier 2007): 128–134. https://doi.org/10.1086/509909.

Gleiser, Reinaldo J., et Carlos N. Kozameh. « Astrophysical limits on quantum gravity motivated birefringence ». *Physical Review D* 64, nº 8 (septembre 2001): 083007. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.083007.

Goldstein, Sheldon, et Stefan Teufel. « Quantum spacetime without observers: ontological clarity and the conceptual foundations of quantum gravity ». *arXiv:quant-ph/9902018*, 5 février 1999. http://arxiv.org/abs/quant-ph/9902018.

Goodman, Jeremy. « Geocentrism reexamined ». *Physical Review D* 52, nº 4 (15 août 1995): 1821-27. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.1821.

Graña, Mariana. « The Low Energy Limit of String Theory and Its Compactifications with Background Fluxes ». *Letters in Mathematical Physics* 78, nº 3 (1 décembre 2006): 279-305. https://doi.org/10.1007/s11005-006-0125-z.

Grant, Edward. *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages: Their Religious, Institutional and Intellectual Contexts*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1996.

Green, M. B., J. H. Schwarz, et E. Witten. « Superstring Theory. Vol. 1: Introduction ». *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik* 68, nº 6 (1988): 258-258. https://doi.org/10.1002/zamm.19880680630.

Greene, Brian. *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. 2nd ed. edition. New York London: W. W. Norton & Company, 2010.

Grujic, Petar V. « Some epistemic questions of cosmology ». *arXiv:0709.3191 [physics]*, 20 septembre 2007. http://arxiv.org/abs/0709.3191.

Grünbaum, Adolf. *Philosophical Problems of Space and Time: Second, Enlarged Edition*. Springer Science & Business Media, 2012.

Hacking, Ian. « Do We See Through a Microscope? » *Pacific Philosophical Quarterly* 62, nº 4 (1981): 305–322.

———. « Representing and Intervening by Ian Hacking ». Cambridge Core, octobre 1983. https://doi.org/10.1017/CBO9780511814563.

———. *The Social Construction of What?* Revised edition. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 2000.

Hagar, Amit, et Meir Hemmo. « The Primacy of Geometry ». ResearchGate, 2013. https://www.researchgate.net/publication/259158226_The_primacy_of_geometry.

Hall, L. J., et U. Sarid. « Gravitational Smearing of Minimal Supersymmetric Unification Predictions ». *Physical Review Letters* 70, nº 18 (3 mai 1993): 2673-76. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.2673.

Hambaryan, V., V. Suleimanov, F. Haberl, A. D. Schwope, R. Neuhaeuser, M. Hohle, et K. Werner. « On the compactness of the isolated neutron star RX J0720.4-3125 ». *Astronomy & Astrophysics* 601 (mai 2017): A108. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630368.

Hamber, Herbert W. *Quantum Gravitation: The Feynman Path Integral Approach*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. https://www.springer.com/gp/book/9783540852926.

Hansson, Johan. « Aspects of nonrelativistic quantum gravity ». *arXiv:0910.4289 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph, physics:quant-ph]*, 22 octobre 2009. http://arxiv.org/abs/0910.4289.

Hansson, Johan, et Stephane Francois. « Testing Quantum Gravity ». *International Journal of Modern Physics D* 26, nº 12 (octobre 2017): 1743003. https://doi.org/10.1142/S0218271817430039.
Harman, P. M., et Peter Michael Harman. *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*. Cambridge University Press, 2001.
Haro, Sebastian de, Dennis Dieks, Gerard 't Hooft, et Erik Verlinde. « Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations ». *Foundations of Physics* 43, nº 1 (1 janvier 2013): 1-7. https://doi.org/10.1007/s10701-012-9691-3.
Hassan, S. F., et Rachel A. Rosen. « Bimetric Gravity from Ghost-Free Massive Gravity ». *Journal of High Energy Physics* 2012, nº 2 (24 février 2012): 126. https://doi.org/10.1007/JHEP02(2012)126.
Hawking, S. W. « Gravitational Radiation from Colliding Black Holes ». *Physical Review Letters* 26, nº 21 (24 mai 1971): 1344-46. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1344.
———. « Particle Creation by Black Holes ». *Communications in Mathematical Physics* 43, nº 3 (1 août 1975): 199-220. https://doi.org/10.1007/BF02345020.
Hawking, S. W., et W. Israel. *Quantum Cosmology, in Three Hundred Years of Gravitation*. Cambridge University Press, 1989.
Hawking, Stephen. « Gödel and the End of Physics », 2003. https://www.caltech.edu/campus-life-events/master-calendar/stephen-hawking-goumldel-and-the-end-of-physics.
Hawking, Stephen W., G. F. R. Ellis, P. V. Landshoff, D. R. Nelson, D. W. Sciama, et S. Weinberg. *The Large Scale Structure of Space-Time*. New Ed edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1975.
Heckman, Jonathan J., et Cumrun Vafa. « Flavor Hierarchy From F-theory ». *Nuclear Physics B* 837, nº 1-2 (septembre 2010): 137-51. https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2010.05.009.
Hedrich, Reiner. « The Internal and External Problems of String Theory: A Philosophical View ». *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 38, nº 2 (2006): 261–278.
Hehl, Friedrich W., Paul von der Heyde, G. David Kerlick, et James M. Nester. « General relativity with spin and torsion: Foundations and prospects ». *Reviews of Modern Physics* 48, nº 3 (1 juillet 1976): 393-416. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.48.393.
Herapath, J. « On the Causes, Laws and Phenomena of Heat, Gases, Gravitation I, II, III, in Annals of Philosophy, or Magazine of Chemistry, Mineralogy, Mechanics, Natural History, Agriculture and the Arts 1 Pp. 273–293 »,. Atticus Rare Books, 1821. https://www.atticusrarebooks.com/pages/books/761/john-herapath/on-the-causes-laws-and-phenomena-of-heat-gases-gravitation-i-ii-iii-in-annals-of-philosophy-or.
Hetherington, N. S. « Sirius B and the Gravitational Redshift: An Historical Review ». ResearchGate, 1980. https://www.researchgate.net/publication/234478409_Sirius_B_and_the_gravitational_redshift_An_historical_review.
Heusler, Markus, Piotr T. Chruściel, et João Lopes Costa. « Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond ». *Living Reviews in Relativity* 15, nº 1 (décembre 2012): 7. https://doi.org/10.12942/lrr-2012-7.
Hill, G. W. « The Collected Mathematical Works of G. W. Hill ». *Nature* 75, nº 1936 (décembre 1906): 123. https://doi.org/10.1038/075123a0.
Holt, Niles. « Wilhelm Ostwald's 'The Bridge' ». *British Journal for the History of Science* 10, nº 2 (1977): 146–150.

Holton, Gerald. « Einstein, Michelson, and the “Crucial” Experiment ». *Isis: A Journal of the History of Science* 60 (1969): 132–197.
Hooft, G. ’t. « Dimensional Reduction in Quantum Gravity ». *arXiv:gr-qc/9310026*, 19 octobre 1993. http://arxiv.org/abs/gr-qc/9310026.
Hooft, G. ’t, et M. Veltman. « One-loop divergencies in the theory of gravitation ». *Annales de L’Institut Henri Poincare Section (A) Physique Theorique* 20 (1974): 69-94. http://adsabs.harvard.edu/abs/1974AIHPA..20...69T.
Horvath, J. E., E. A. Logiudice, C. Riveros, et H. Vucetich. « Einstein equivalence principle and theories of gravitation: A gravitationally modified standard model ». *Physical Review D* 38, nº 6 (15 septembre 1988): 1754-60. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.38.1754.
Hossenfelder, Sabine. « Experimental Search for Quantum Gravity ». *arXiv:1010.3420 [gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th]*, 17 octobre 2010. http://arxiv.org/abs/1010.3420.
Hossenfelder, Sabine, et Tobias Mistele. « The Redshift-Dependence of Radial Acceleration: Modified Gravity versus Particle Dark Matter ». *International Journal of Modern Physics D* 27, nº 14 (octobre 2018): 1847010. https://doi.org/10.1142/S0218271818470107.
Hossenfelder, Sabine, et Lee Smolin. « Phenomenological Quantum Gravity ». *arXiv:0911.2761 [gr-qc, physics:physics]*, 14 novembre 2009. http://arxiv.org/abs/0911.2761.
Howard, Don A. « Einstein’s Philosophy of Science ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Fall 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/einstein-philscience/.
Huggett, Nick, Tiziana Vistarini, et Christian Wuthrich. « Time in quantum gravity ». *arXiv:1207.1635 [gr-qc, physics:physics]*, 3 juillet 2012. http://arxiv.org/abs/1207.1635.
Hulse, R. A., et J. H. Taylor. « Discovery of a pulsar in a binary system ». *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 janvier 1975): L51-53. https://doi.org/10.1086/181708.
Huygens, Christiaan. *Discours de La Cause de La Pesanteur*, 1885.
Ibanez, L. E. « The second string (phenomenology) revolution ». *Classical and Quantum Gravity* 17, nº 5 (7 mars 2000): 1117-28. https://doi.org/10.1088/0264-9381/17/5/321.
Iorio, Lorenzo. « An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging ». *Space Science Reviews* 148, nº 1-4 (décembre 2009): 363-81. https://doi.org/10.1007/s11214-008-9478-1.
———. « On the Lense-Thirring test with the Mars Global Surveyor in the gravitational field of Mars ». *Open Physics* 8, nº 3 (1 janvier 2010). https://doi.org/10.2478/s11534-009-0117-6.
Ivanchik, A. V., A. Y. Potekhin, et D. A. Varshalovich. « The fine-structure constant: a new observational limit on its cosmological variation and some theoretical consequences ». *arXiv:astro-ph/9810166*, 10 octobre 1998. http://arxiv.org/abs/astro-ph/9810166.
Jain, Bhuvnesh, Vinu Vikram, et Jeremy Sakstein. « Astrophysical Tests of Modified Gravity: Constraints from Distance Indicators in the Nearby Universe ». *The Astrophysical Journal* 779, nº 1 (25 novembre 2013): 39. https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/39.
Jaki, Stanley L. *The Relevance of Physics*. First Edition edition. Chicago: University Of Chicago Press, 1966.
Janiak, Andrew. *Newton as Philosopher*. Cambridge University Press, 2010.
Jaranowski, Piotr, et Andrzej Królak. « Gravitational-Wave Data Analysis. Formalism and Sample Applications: The Gaussian Case ». *Living Reviews in Relativity* 8, nº 1 (21 mars 2005): 3. https://doi.org/10.12942/lrr-2005-3.
Joshi, Pankaj S. « Cosmic Censorship: A Current Perspective ». *arXiv:gr-qc/0206087*, 28 juin 2002. http://arxiv.org/abs/gr-qc/0206087.

Kallosh, Renata, Andrei Linde, Dmitri Linde, et Leonard Susskind. « Gravity and global symmetries ». *Physical Review D* 52, nº 2 (15 juillet 1995): 912-35. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.912.

Kaluza, Theodor. « Zum Unitätsproblem in der Physik | BibSonomy », 1921. https://www.bibsonomy.org/bibtex/19218e3a965ffaefa3af2d4c14bb5ae52/zhaozhh02.

Kaufmann, W. « Über die Konstitution des Elektrons ». *Annalen der Physik* 324 (1906): 487-553. https://doi.org/10.1002/andp.19063240303.

Kennefick, Daniel, et Jürgen Renn. *Astronomers Test General Relativity: Light-bending and the Solar Redshift, in Albert Einstein - Chief Engineer of the Universe: 100 Authors for Einstein Essays*, 2005. http://adsabs.harvard.edu/abs/2005alei.book.....R.

Kiefer, C. « Quantum gravity: general introduction and recent developments ». *Annalen der Physik* 518 (1 janvier 2006): 129-48. https://doi.org/10.1002/andp.200510175.

———. « Time in Quantum Gravity ». In *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, édité par Craig Callender, 667. Oxford University Press, 2011.

Kiefer, Claus. « Quantum Gravity — A Short Overview ». In *Quantum Gravity: Mathematical Models and Experimental Bounds*, édité par Bertfried Fauser, Jürgen Tolksdorf, et Eberhard Zeidler, 1-13. Basel: Birkhäuser Basel, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7978-0_1.

Klebanov, Igor R., et Juan M. Maldacena. « Solving quantum field theories via curved spacetimes ». *Physics Today* 62, nº 1 (1 janvier 2009): 28-33. https://doi.org/10.1063/1.3074260.

Kopeikin, Sergei M. « Testing the Relativistic Effect of the Propagation of Gravity by Very Long Baseline Interferometry ». *The Astrophysical Journal* 556, nº 1 (2001): L1-5. https://www.academia.edu/18481905/TESTING_THE_RELATIVISTIC_EFFECT_OF_THE_PROPAGATION_OF_GRAVITY_BY_VERY_LONG_BASELINE_INTERFEROMETRY.

Kopeikin, Sergei M., et Edward B. Fomalont. « Gravimagnetism, Causality, and Aberration of Gravity in the Gravitational Light-Ray Deflection Experiments ». *General Relativity and Gravitation* 39, nº 10 (1 octobre 2007): 1583-1624. https://doi.org/10.1007/s10714-007-0483-6.

Kostelecky, Alan, et Rob Potting. « Expectation Values, Lorentz Invariance, and CPT in the Open Bosonic String ». *Physics Letters B* 381, nº 1-3 (juillet 1996): 89-96. https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00589-8.

Koyre, Alexandre. *From the Closed World to the Infinite Universe*. Johns Hopkins University Press, 1957.

Kragh, Helge. *Dirac: A Scientific Biography*. 1 edition. Cambridge England ; New York: Cambridge University Press, 1990.

———. « Fundamental Theories and Epistemic Shifts: Can History of Science Serve as a Guide? » *arXiv:1702.05648 [physics]*, 18 février 2017. http://arxiv.org/abs/1702.05648.

Kramer, Michael. « Millisecond Pulsarsas Tools of Fundamental Physics ». In *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants*, édité par Savely G. Karshenboim et Ekkehard Peik, 33-54. Lecture Notes in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. https://doi.org/10.1007/978-3-540-40991-5_3.

Krisher, null, null Maleki, null Lutes, null Primas, null Logan, null Anderson, et null Will. « Test of the Isotropy of the One-Way Speed of Light Using Hydrogen-Maser Frequency Standards ». *Physical Review. D, Particles and Fields* 42, nº 2 (15 juillet 1990): 731-34.

Kristian, J., et R. K. Sachs. « Observations in Cosmology ». *The Astrophysical Journal* 143 (1 février 1966): 379. https://doi.org/10.1086/148522.

Krolik, Julian Henry. *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*. Princeton University Press, 1999.

Kroupa, Pavel. *The vast polar structures around the Milky Way and Andromeda*, 2013. https://www.youtube.com/watch?v=UPVGDXNSBZM.

Kuchař, Karel. « Canonical Quantization of Gravity ». *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237-88. https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5.

Kuchar, Karel. « Canonical Quantum Gravity ». *arXiv:gr-qc/9304012*, 8 avril 1993. http://arxiv.org/abs/gr-qc/9304012.

Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. 3rd edition. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1996.

Kuhn, Thomas S., et Jim Conant. *The Road Since Structure: Philosophical Essays, 1970-1993, with an Autobiographical Interview*. University of Chicago Press, 2000.

Kustaanheimo, Paul Edwin, et V. S. Nuotio. *Relativistic Theories of Gravitation*. Helsingin Yliopisto. Department of Applied Mathematics, 1967.

Lakatos, Imre. « Criticism and the Methodology of Scientific Research Programmes ». *Proceedings of the Aristotelian Society* 69, nº 1 (1968): 149–186.

———. *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers*. Cambridge University Press, 1980.

Lam, Vincent. « Quantum Structure and Spacetime. » *Metaphysics in Contemporary Physics*, 1 janvier 2016, 81-99. https://doi.org/10.1163/9789004310827_005.

Lam, Vincent, et Michael Esfeld. « The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity ». *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 43, nº 2 (2012): 243–258.

Landau, L. D., et E. M. Lifshitz. *Fluid Mechanics: Volume 6*. 2 edition. Amsterdam u.a: Butterworth-Heinemann, 1987.

Laplace, Pierre-Simon Marquis De. *Exposition du systéme du monde*. 2e éd. Cambridge; 2009: Cambridge University Press, 2009.

Larmor, Joseph. *On the ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in relation to the Constitution of Matter, and on the FitzGerald-Lorentz Hypothesis*, 1904.

Latour, Bruno, Steve Woolgar, et Jonas Salk. *Laboratory Life: The Construction of Scientific Facts, 2nd Edition*. 2nd edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 1986.

Laudan, L. *Progress and its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth*. University of California Press, 1977.

Laudan, Larry. « Progress or Rationality? The Prospects for Normative Naturalism ». *American Philosophical Quarterly* 24, nº 1 (1987): 19–31.

Le Verrier, U. *Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète, in Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. Paris : Gauthier-Villars, 1859. http://archive.org/details/comptesrendusheb49acad.

Lehmkuhl, D., D. Dieks, et M. Redei. « Is spacetime a gravitational field?, in The Ontology of Spacetime II, Volume 4 - 1st Edition », 2008. https://www.elsevier.com/books/the-ontology-of-spacetime-ii/dieks/978-0-444-53275-6.

Lemaître, Abbé G. « A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulæ ». *Monthly Notices of the*

Royal Astronomical Society 91, nº 5 (13 mars 1931): 483-90. https://doi.org/10.1093/mnras/91.5.483.

Lense, Josef, et Hans Thirring. « Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie ». *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918). http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PhyZ...19..156L.

Leonhardt, U., et P. Piwnicki. « Relativistic Effects of Light in Moving Media with Extremely Low Group Velocity ». *Physical Review Letters* 84, nº 5 (31 janvier 2000): 822-25. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.822.

Lewandowski, Jerzy, Andrzej Okołów, Hanno Sahlmann, et Thomas Thiemann. « Uniqueness of Diffeomorphism Invariant States on Holonomy–Flux Algebras ». *Communications in Mathematical Physics* 267, nº 3 (1 novembre 2006): 703-33. https://doi.org/10.1007/s00220-006-0100-7.

Lightman, A. P., et D. L. Lee. « Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle ». *Physical Review. D, Particles Fields* 8, nº 2 (1973): 364-76. http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:5098997.

LIGO Scientific Collaboration. « Detection of gravitational waves », 2019. https://www.ligo.org/detections.php.

Lineweaver, C. H., L. Tenorio, G. F. Smoot, P. Keegstra, A. J. Banday, et P. Lubin. « The Dipole Observed in the COBE DMR 4 Year Data ». *The Astrophysical Journal* 470 (1 octobre 1996): 38. https://doi.org/10.1086/177846.

Lisi, A. Garrett. « An Exceptionally Simple Theory of Everything ». *arXiv:0711.0770 [gr-qc, physics:hep-th]*, 6 novembre 2007. http://arxiv.org/abs/0711.0770.

Lizarraga, Joanes, Jon Urrestilla, David Daverio, Mark Hindmarsh, Martin Kunz, et Andrew R. Liddle. « Fitting BICEP2 with defects, primordial gravitational waves and dust ». *Journal of Physics: Conference Series* 600 (28 avril 2015): 012025. https://doi.org/10.1088/1742-6596/600/1/012025.

Lodge, Oliver. « The Geometrisation of Physics, and Its Supposed Basis on the Michelson-Morley Experiment ». News. Nature, 1921. https://doi.org/10.1038/106795a0.

Lomonosov, Mikhail Vasil'evich. *Mikhail Vasil'evich Lomonosov on the Corpuscular Theory*. First edition. edition. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1970.

Long, Joshua C., Hilton W. Chan, Allison B. Churnside, Eric A. Gulbis, Michael C. M. Varney, et John C. Price. « Upper Limits to Submillimetre-Range Forces from Extra Space-Time Dimensions ». *Nature* 421, nº 6926 (février 2003): 922. https://doi.org/10.1038/nature01432.

Lorentz, Hendrik A. « Considerations on Gravitation ». In *The Genesis of General Relativity*, édité par Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, et John Stachel, 1038-52. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_13.

Lorenz, Sean. « A Cautious Ontology of Spacetime in Quantum Gravity ». ResearchGate, 2015. https://www.researchgate.net/publication/268296604_A_CAUTIOUS_ONTOLOGY_OF_SPACETIME_IN_QUANTUM_GRAVITY.

Lyth, David H., et Antonio Riotto. « Particle physics models of inflation and the cosmological density perturbation ». *Physics Reports* 314, nº 1 (1 juin 1999): 1-146. https://doi.org/10.1016/S0370-1573(98)00128-8.

Maddox, John. *What Remains to Be Discovered: Mapping the Secrets of the Universe, the Origins of Life, and the Future of the Human Race*. 1st Touchstone Ed edition. New York: Free Press, 1999.

Mandl, Franz, et Graham Shaw. *Lagrangian Field Theory, in Quantum Field Theory*. John Wiley & Sons, 2013.

Marck, J. A. « Shortcut method of solution of geodesic equations for schwarzschild black hole ». *Classical and Quantum Gravity* 13, nº 3 (1 mars 1996): 393-402. https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/3/007.

Marion, H., F. Pereira Dos Santos, M. Abgrall, S. Zhang, Y. Sortais, S. Bize, I. Maksimovic, et al. « A Search for Variations of Fundamental Constants using Atomic Fountain Clocks ». *Physical Review Letters* 90, nº 15 (18 avril 2003): 150801. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150801.

Mathur, Samir D. « The Information Paradox: Conflicts and Resolutions ». *Pramana* 79, nº 5 (1 novembre 2012): 1059-73. https://doi.org/10.1007/s12043-012-0417-z.

Matsubara, Keizo. « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ». *Synthese* 190, nº 3 (2013): 471–489.

———. *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research*. Filosofiska Institutionen, Uppsala universitet, 2012.

Matthews, Thomas A., et Allan R. Sandage. « Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects. » *The Astrophysical Journal* 138 (1 juillet 1963): 30. https://doi.org/10.1086/147615.

Mattingly, James. « Is Quantum Gravity Necessary? » In *The Universe of General Relativity*, édité par A. J. Kox et Jean Eisenstaedt, 327-38. Einstein Studies. Birkhäuser Boston, 2005.

Maudlin, Tim. « On the Unification of Physics ». *Journal of Philosophy* 93, nº 3 (1996): 129–144.

Maxwell, Nicholas. *Karl Popper, Science and Enlightenment*. London: UCL Press, 2017.

———. « The Need for a Revolution in the Philosophy of Science ». *Journal for General Philosophy of Science* 33, nº 2 (1 décembre 2002): 381-408. https://doi.org/10.1023/A:1022480009733.

McGaugh, Stacy S. « A tale of two paradigms: the mutual incommensurability of ΛCDM and MOND ». *Canadian Journal of Physics* 93, nº 2 (21 avril 2014): 250-59. https://doi.org/10.1139/cjp-2014-0203.

Melchiorri, A., P. A. R. Ade, P. de Bernardis, J. J. Bock, J. Borrill, A. Boscaleri, B. P. Crill, et al. « A measurement of Omega from the North American test flight of BOOMERANG ». *The Astrophysical Journal* 536, nº 2 (20 juin 2000): L63-66. https://doi.org/10.1086/312744.

Meli, Domenico. « The Relativization of Centrifugal Force ». *Isis: A Journal of the History of Science* 81 (1990): 23–43.

Merali, Zeeya. « Astrophysics: Fire in the Hole! » *Nature News* 496, nº 7443 (4 avril 2013): 20. https://doi.org/10.1038/496020a.

———. « LIGO Black Hole Echoes Hint at General-Relativity Breakdown ». *Nature News*, 2016. https://doi.org/10.1038/nature.2016.21135.

Merritt, David. « Gravity: The Popper Problem ». IAI TV - Changing how the world thinks, 2 octobre 2017. https://iai.tv/articles/gravity-the-popper-problem-auid-899.

Mignard, François, et F. Arenou. « Determination of the ppn parameter with the hipparcos data », 1997.

Milgrom, M. « A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis ». *The Astrophysical Journal* 270 (juillet 1983): 365. https://doi.org/10.1086/161130.

Milgrom, Mordehai. « MOND laws of galactic dynamics ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 437, nº 3 (21 janvier 2014): 2531-41. https://doi.org/10.1093/mnras/stt2066.

———. « Quasi-linear formulation of MOND ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403, nº 2 (4 février 2010): 886-95. https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16184.x.

Miller, Cole. « Stellar Structure and Evolution (Lecture notes for Astronomy 606) », 2002. http://www.astro.umd.edu/~miller/teaching/astr606/.

Milne, E. A. *Kinematic relativity*. Facsimile Publisher, 2015.

Misner, Charles W., Kip S. Thorne, et John Archibald Wheeler. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973.

Moore, Gregory. « What Is... a Brane? » *Notices of the American Mathematical Society* 52, nº 2 (28 novembre 2005): 214-15. https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/what-is-a-brane.

Muñoz, José A., Evencio Mediavilla, Christopher S. Kochanek, Emilio Falco, et Ana María Mosquera. « A Study of Gravitational Lens Chromaticity with the Hubble Space Telescope ». *The Astrophysical Journal* 742, nº 2 (1 décembre 2011): 67. https://doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/67.

Nambu, Y. « Directions of Particle Physics ». *Progress of Theoretical Physics Supplement* 85 (1985): 104-10. https://doi.org/10.1143/PTPS.85.104.

Narayan, Ramesh, et Matthias Bartelmann. « Lectures on Gravitational Lensing ». *arXiv:astro-ph/9606001*, 3 juin 1996. http://arxiv.org/abs/astro-ph/9606001.

Narayan, Ramesh, et Jeffrey E. McClintock. « Advection-dominated accretion and the black hole event horizon ». *New Astronomy Reviews*, Jean-Pierre Lasota, X-ray Binaries, Accretion Disks and Compact Stars, 51, nº 10 (1 mai 2008): 733-51. https://doi.org/10.1016/j.newar.2008.03.002.

Narlikar, Jayant Vishnu. *Introduction to Cosmology*. Jones and Bartlett, 1983.

NASA. « Black Holes | Science Mission Directorate », 2019. https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes.

Natorp, Paul. *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*. Sändig Reprint, H. R. Wohlwend, 1910.

Newton, Isaac. *An Account of the Book Entitled Commercium Epistolicum Collinii & Aliorum, de Analysi Promota*, 1715.

———. *Opticks : Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. London : Printed for William Innys at the West-End of St. Paul's, 1730. http://archive.org/details/opticksortreatis1730newt.

———. « Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed. » The British Library, 1687. https://www.bl.uk/collection-items/newtons-principia-mathematica.

———. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*, 1713. https://www.e-rara.ch/zut/338618.

———. « Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed. » *Science* 177, nº 4046 (1726): 340-42. https://doi.org/10.1126/science.177.4046.340.

Ng, Y. Jack, et H. van Dam. « Measuring the foaminess of space-time with gravity-wave interferometers ». *Foundations of Physics* 30, nº 5 (2000): 795-805. https://doi.org/10.1023/A:1003745212871.

Ni, W.-T. « Equivalence principles and electromagnetism ». *Physical Review Letters* 38 (1 février 1977): 301-4. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.301.

Nicolai, Hermann, Kasper Peeters, et Marija Zamaklar. « Loop quantum gravity: an outside view ». *Classical and Quantum Gravity* 22, nº 19 (7 octobre 2005): R193-247. https://doi.org/10.1088/0264-9381/22/19/R01.

Nordtvedt, K. « Gravitomagnetic interaction and laser ranging to Earth satellites ». *Physical Review Letters* 61, nº 23 (5 décembre 1988): 2647-49. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2647.

Nordtvedt, Kenneth. « Equivalence Principle for Massive Bodies. I. Phenomenology ». ResearchGate, 1968. https://www.researchgate.net/publication/243706608_Equivalence_Principle_for_Massive_Bodies_I_Phenomenology.

———. « Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory ». *Physical Review* 169, nº 5 (25 mai 1968): 1017-25. https://doi.org/10.1103/PhysRev.169.1017.

———. « Lunar Laser Ranging - a comprehensive probe of post-Newtonian gravity ». *arXiv:gr-qc/0301024*, 7 janvier 2003. http://arxiv.org/abs/gr-qc/0301024.

———. « The Relativistic Orbit Observables in Lunar Laser Ranging ». ResearchGate, 1995. https://www.researchgate.net/publication/223758280_The_Relativistic_Orbit_Observables_in_Lunar_Laser_Ranging.

Nordtvedt, Kenneth, Jr., et Clifford M. Will. « Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity ». *The Astrophysical Journal* 177 (1 novembre 1972): 775. https://doi.org/10.1086/151755.

Norton, John. *How Einstein Found His Field Equations: 1912-1915*, 1984.

Norton, John D. « General Covariance and the Foundations of General Relativity: Eight Decades of Dispute ». *Reports of Progress in Physics* 56 (1993): 791–861.

Nugayev, R. M. « The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz ». *Philosophy of Science* 52, nº 1 (1985): 44–63.

Ohanian, Hans C., et Remo Ruffini. *Gravitation and Spacetime*. Norton, 1994.

Ohta, T., et R. B. Mann. « Canonical reduction of two-dimensional gravity for Particle Dynamics ». *Classical and Quantum Gravity* 13, nº 9 (1 septembre 1996): 2585-2602. https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/9/022.

Oldershaw, Robert L. « The new physics—Physical or mathematical science? » *American Journal of Physics* 56, nº 12 (1 décembre 1988): 1075-81. https://doi.org/10.1119/1.15749.

Ouellette, Jennifer. « Black Hole Firewalls Confound Theoretical Physicists ». Scientific American, 2012. https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-firewalls-confound-theoretical-physicists/.

Overbye, Dennis. « Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast? » *The New York Times*, 20 février 2017, sect. Science. https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html.

Overduin, James, Francis Everitt, John Mester, et Paul Worden. « The Science Case for STEP ». *Advances in Space Research* 43, nº 10 (15 mai 2009): 1532-37. https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.02.012.

Pais, Abraham. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005.

Partridge, R. B. *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation*. Cambridge University Press, 2007.

Pearle, null. « Combining Stochastic Dynamical State-Vector Reduction with Spontaneous Localization ». *Physical Review. A, General Physics* 39, nº 5 (1 mars 1989): 2277-89.

Peat, F. David. *Superstrings and the Search for the Theory of Everything*. 1 edition. Place of publication not identified: McGraw-Hill Education, 1989.

Peebles, P. J. E., et Bharat Ratra. « The cosmological constant and dark energy ». *Reviews of Modern Physics* 75, nº 2 (22 avril 2003): 559-606. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.559.

Peik, E., B. Lipphardt, H. Schnatz, T. Schneider, Chr Tamm, et S. G. Karshenboim. « New limit on the present temporal variation of the fine structure constant ». *Physical Review Letters* 93, nº 17 (18 octobre 2004): 170801. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.170801.

Penrose, R. « Singularities and time-asymmetry. », 581-638, 1979. http://adsabs.harvard.edu/abs/1979grec.conf..581P.

Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Reprint edition. New York: Vintage, 2007.

Petit, J. P., et G. D'Agostini. « Cosmological bimetric model with interacting positive and negative masses and two different speeds of light, in agreement with the observed acceleration of the Universe ». *Modern Physics Letters A* 29, nº 34 (27 octobre 2014): 1450182. https://doi.org/10.1142/S021773231450182X.

Petzoldt, Joseph, Giora Hon, et Ernst Mach. *Der Verhältnis der Machschen Gedankenwelt zur Relativitätstheorie, an appendix to Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt*. Xenomoi Verlag, 1921.

Pickering, Andrew. « The Hunting of the Quark ». *Isis* 72, nº 2 (1981): 216–236.

———. *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*. 1 edition. Chicago: University of Chicago Press, 1995.

Pierris, Graciela de. « Hume and Locke on Scientific Methodology: The Newtonian Legacy ». *Hume Studies* 32, nº 2 (2006): 277–329.

Pinna, S., et Simone Pinna. « A Conceptual Test for Cognitively Coherent Quantum Gravity Models », 2017. https://doi.org/10.3390/technologies5030051.

Poincaré, Henri. « Les Relations Entre La Physique Expérimentale et La Physique Mathématique, in Revue Générale Des Sciences Pures et Appliquées ». Issue. Gallica, 1900. https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k17075r.

Poincare, Henri. *Science and Hypothesis*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.

———. *The Foundations of Science; Science and Hypothesis, the Value of Science, Science and Method*. Place of publication not identified: TheClassics.us, 2013.

Polchinski, Joseph. « Dualities of Fields and Strings ». *arXiv:1412.5704 [hep-th]*, 17 décembre 2014. http://arxiv.org/abs/1412.5704.

Pollio, Vitruvius. *De architectura*. Torino: Giulio Einaudi, 1997.

Popper, Karl. *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. 2nd edition. London ; New York: Routledge, 2002.

Popper, Karl Raimund. *The Logic of Scientific Discovery*. Psychology Press, 2002.

Pound, R. V., et G. A. Rebka. « Apparent Weight of Photons ». *Physical Review Letters* 4, nº 7 (1 avril 1960): 337-41. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337.

Prugovecki, Eduard. « Historical and Epistemological Perspectives on Developments in Relativity and Quantum Theory ». ResearchGate, 1992. https://www.researchgate.net/publication/300434048_Historical_and_Epistemological_Perspectives_on_Developments_in_Relativity_and_Quantum_Theory.

Quine, W. V. « On the Reasons for Indeterminacy of Translation ». The Journal of Philosophy, 1 janvier 1970. https://doi.org/10.2307/2023887.

———. *Ontological Relativity & Other Essays*. New York: Columbia University Press, 1969.

Quine, Willard V. « On Empirically Equivalent Systems of the World ». *Erkenntnis* 9, nº 3 (1975): 313–28.

Randall, Lisa, et Raman Sundrum. « A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension ». *Physical Review Letters* 83, nº 17 (25 octobre 1999): 3370-73. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.3370.

———. « An Alternative to Compactification ». *Physical Review Letters* 83, nº 23 (6 décembre 1999): 4690-93. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690.

Reichenbach, Hans. *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. 1 Plate. De Gruyter, 1928.

———. *Relativitätstheorie Und Erkenntnis Apriori*. J. Springer, 1920.

———. *The Philosophy of Space and Time*. 1st edition. New York, NY: Dover Publications, 1957.

Rendall, Alan D. « The nature of spacetime singularities ». *arXiv:gr-qc/0503112*, novembre 2005, 76-92. https://doi.org/10.1142/9789812700988_0003.

Reyes, Reinabelle, Rachel Mandelbaum, Uros Seljak, Tobias Baldauf, James E. Gunn, Lucas Lombriser, et Robert E. Smith. « Confirmation of general relativity on large scales from weak lensing and galaxy velocities ». *Nature* 464, nº 7286 (mars 2010): 256-58. https://doi.org/10.1038/nature08857.

Rham, Claudia de, Gregory Gabadadze, et Andrew J. Tolley. « Resummation of Massive Gravity ». *Physical Review Letters* 106, nº 23 (10 juin 2011): 231101. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.231101.

Rickles, Dean. « A philosopher looks at string dualities ». *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 54-67. https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005.

———. « Quantum Gravity: A Primer for Philosophers. » Preprint, octobre 2008. http://philsci-archive.pitt.edu/5387/.

Riemann, B. *Neue mathematische Prinzipien der Naturphilosophie*. Leipzig: Dedekind, R.; Weber, W., 1876.

Riemann, Bernhard, et Hermann Weyl. *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1919. https://www.springer.com/gp/book/9783662423165.

Ries, John C, Richard J Eanes, Byron D Tapley, et Glenn E Peterson. « Prospects for an Improved Lense-Thirring Test with SLR and the GRACE Gravity Mission », s. d., 7.

Ritz, Walther. « Recherches critiques sur l'électrodynamique générale ». *Annales de chimie et de physique*, 1908.

Rogers, G. A. J. « Locke's Essay and Newton's Principia ». *Journal of the History of Ideas* 39, nº 2 (1978): 217.

Roll, P. G., R. Krotkov, et R. H. Dicke. « The equivalence of inertial and passive gravitational mass ». *Annals of Physics* 26 (1 février 1964): 442-517. https://doi.org/10.1016/0003-4916(64)90259-3.

Romero, Gustavo E. « Philosophical Issues of Black Holes ». *arXiv:1409.3318 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:physics]*, 10 septembre 2014. http://arxiv.org/abs/1409.3318.

Rosen, N. « General Relativity and Flat Space. I ». *Physical Review* 57, nº 2 (15 janvier 1940): 147-50. https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.147.

Rosenfeld, L. « On quantization of fields ». *Nuclear Physics* 40 (1 février 1963): 353-56. https://doi.org/10.1016/0029-5582(63)90279-7.

Rovelli, Carlo. « Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time ». In *The Cosmos of Science*, édité par John Earman et John Norton, 180–223. University of Pittsburgh Press, 1997.

———. « Notes for a brief history of quantum gravity ». *arXiv:gr-qc/0006061*, 16 juin 2000. http://arxiv.org/abs/gr-qc/0006061.

———. « Quantum Gravity ». Cambridge Core, novembre 2004. https://doi.org/10.1017/CBO9780511755804.
———. « Relational Quantum Mechanics ». *International Journal of Theoretical Physics* 35, nº 8 (août 1996): 1637-78. https://doi.org/10.1007/BF02302261.
———. « The Disappearance of Space and Time ». In *The Disappearance of Space and Time*, édité par Dennis Dieks. Elsevier, 2007.
Russell, Bertrand. *Relativity: Philosophical Consequences, in Encyclopaedia Britannica: Thirteenth Edition Volume 31*. ENCYCLOPAEDIA BRITTANICA PRESS, 1926.
———. *The Analysis of Matter*. First Paperback Edition edition. Nottingham: Spokesman Books, 2007.
Ryan, Fintan D. « Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments ». *Physical Review D* 52, nº 10 (15 novembre 1995): 5707-18. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.5707.
Ryckman, Thomas. « A Believing Rationalist ». The Cambridge Companion to Einstein, mai 2014. https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.014.
———. *Einstein*. 1 edition. London ; New York: Routledge, 2011.
———. *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*. 1 edition. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005.
Ryckman, Thomas A. « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Spring 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018. https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/genrel-early/.
Ryden, Barbara. *Introduction to cosmology*, 2003. http://adsabs.harvard.edu/abs/2003itc..book.....R.
Sachdev, Subir. « Strange and Stringy ». *Scientific American* 308 (1 décembre 2012): 44-51. https://doi.org/10.1038/scientificamerican0113-44.
Sadoulet, Bernard. « The Direct Detection of Dark Matter ». ResearchGate, 1998. https://www.researchgate.net/publication/260854303_The_Direct_Detection_of_Dark_Matter.
Salimkhani, Kian. « Quantum Gravity: A Dogma of Unification? » In *Philosophy of Science. European Studies in Philosophy of Science, vol 9.*, édité par Alexander Christian, David Hommen, Nina Retzlaff, et Gerhard Schurz, 23–41. Cham: Springer, 2018.
Sanders, A. J., A. D. Alexeev, S. W. Allison, K. A. Bronnikov, J. W. Campbell, M. R. Cates, T. A. Corcovilos, et al. « Project SEE (Satellite Energy Exchange): Proposal for Space-Based Gravitational Measurements ». *Measurement Science and Technology* 10, nº 6 (janvier 1999): 514–524. https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/6/317.
Sauer, Tilman. « Einstein's Unified Field Theory Program ». The Cambridge Companion to Einstein, mai 2014. https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.011.
Schiff, L. I. « On Experimental Tests of the General Theory of Relativity ». *American Journal of Physics* 28, nº 4 (1 avril 1960): 340-43. https://doi.org/10.1119/1.1935800.
Schiller, S. « Gravitational Physics with Optical Clocks in Space », 2015, 31.
Schilpp, Paul Arthur, éd. *Albert Einstein, Philosopher-Scientist: The Library of Living Philosophers Volume VII*. 3rd edition. La Salle, Ill.: Open Court, 1998.
Schlick, Moritz. *Allgemeine Erkenntnislehre: Abteilung I / Band 1*. Édité par Hans Jürgen Wendel et Fynn Ole Engler. Abteilung I: Veröffentlichte Schriften. Wien: Springer-Verlag, 2009. https://www.springer.com/gp/book/9783211327685.

———. « Kritizistische Oder Empiristische Deutung der Neuen Physik? » *Société Française de Philosophie, Bulletin* 26, nº n/a (1921): 96.

———. *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation*. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2005.

Schmidhuber, Jürgen. « A Computer Scientist's View of Life, the Universe, and Everything. Lecture Notes in Computer Science », 1997. http://people.idsia.ch/~juergen/everything/.

———. « Hierarchies of generalized kolmogorov complexities and nonenumerable universal measures computable in the limit ». *International Journal of Foundations of Computer Science* 13, nº 04 (1 août 2002): 587-612. https://doi.org/10.1142/S0129054102001291.

Schutz, Bernard. « Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz ». Cambridge Core, décembre 2003. https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800.

Schwarz, John H. « String Theory: Progress and Problems ». *Progress of Theoretical Physics Supplement* 170 (1 mai 2007): 214-26. https://doi.org/10.1143/PTPS.170.214.

Seidel, Edward. « Numerical Relativity: Towards Simulations of 3D Black Hole Coalescence ». *arXiv:gr-qc/9806088*, 23 juin 1998. http://arxiv.org/abs/gr-qc/9806088.

Seljak, Uroš, et Matias Zaldarriaga. « Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background ». *Physical Review Letters* 78, nº 11 (17 mars 1997): 2054-57. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2054.

Sellien, Ewald. *Die erkenntnistheoretische Bedeutung der Relativitätstheorie*. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1919.

Sfetcu, Nicolae. *Isaac Newton despre acțiunea la distanță în gravitație - Cu sau fără Dumnezeu?* MultiMedia Publishing, 2018. http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24577.97122.

———. « Reconstructia Rationala a Stiintei Prin Programe de Cercetare », 2019. http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24667.21288.

———. *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale*. MultiMedia Publishing, 2018. http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242.

Shao, Lijing, et Norbert Wex. « Tests of gravitational symmetries with radio pulsars ». *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 59, nº 9 (septembre 2016): 699501. https://doi.org/10.1007/s11433-016-0087-6.

Shapin, Steven, et Simon Schaffer. *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*. Princeton University Press, 1989.

Shapiro, Irwin I. « Fourth Test of General Relativity ». *Physical Review Letters* 13, nº 26 (28 décembre 1964): 789-91. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789.

Shapiro, Irwin I., Michael E. Ash, Richard P. Ingalls, William B. Smith, Donald B. Campbell, Rolf B. Dyce, Raymond F. Jurgens, et Gordon H. Pettengill. « Fourth Test of General Relativity: New Radar Result ». *Physical Review Letters* 26, nº 18 (3 mai 1971): 1132-35. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1132.

Shapiro, S. S., J. L. Davis, D. E. Lebach, et J. S. Gregory. « Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999 ». *Physical Review Letters* 92, nº 12 (26 mars 2004): 121101. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.121101.

Silk, Joseph. « Formation of Galaxies ». The Philosophy of Cosmology, avril 2017. https://doi.org/10.1017/9781316535783.009.

Sitter, W. de. « On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1 décembre 1916): 155-84. https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155.

Smeenk, Christopher, et George Ellis. « Philosophy of Cosmology ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmology/.

Smith, George. « Newton's Philosophiae Naturalis Principia Mathematica ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2008. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2008. https://plato.stanford.edu/archives/win2008/entries/newton-principia/.

Smith, Quentin. *Einstein, Relativity and Absolute Simultaneity*. Édité par William Lane Craig. 1 edition. London: Routledge, 2007.

Smith, W. B. « Radar observations of Venus, 1961 and 1959 ». *The Astronomical Journal* 68 (1 février 1963): 15. https://doi.org/10.1086/108904.

Smolin, Lee. « A perspective on the landscape problem ». *Foundations of Physics* 43, nº 1 (janvier 2013): 21-45. https://doi.org/10.1007/s10701-012-9652-x.

———. « The case for background independence ». *arXiv:hep-th/0507235*, 25 juillet 2005. http://arxiv.org/abs/hep-th/0507235.

———. *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*. Reprint edition. Boston u.a: Mariner Books, 2007.

Song, Yong-Seon, et Olivier Doré. « A step towards testing general relativity using weak gravitational lensing and redshift surveys ». *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2009, nº 03 (23 mars 2009): 025-025. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2009/03/025.

Spergel, D. N., R. Bean, O. Doré, M. R. Nolta, C. L. Bennett, J. Dunkley, G. Hinshaw, et al. « Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology ». *The Astrophysical Journal Supplement Series* 170, nº 2 (juin 2007): 377-408. https://doi.org/10.1086/513700.

Spergel, D. N., L. Verde, H. V. Peiris, E. Komatsu, M. R. Nolta, C. L. Bennett, M. Halpern, et al. « First-YearWilkinson Microwave Anisotropy Probe(WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters ». *The Astrophysical Journal Supplement Series* 148, nº 1 (septembre 2003): 175–194. https://doi.org/10.1086/377226.

Springel, Volker, Simon D. M. White, Adrian Jenkins, Carlos S. Frenk, Naoki Yoshida, Liang Gao, Julio Navarro, et al. « Simulations of the Formation, Evolution and Clustering of Galaxies and Quasars ». *Nature* 435, nº 7042 (juin 2005): 629. https://doi.org/10.1038/nature03597.

Stanley, Matthew. « "An Expedition to Heal the Wounds of War" The 1919 Eclipse and Eddington as Quaker Adventurer ». *Isis* 94, nº 1 (1 mars 2003): 57-89. https://doi.org/10.1086/376099.

Stanwix, Paul L., Michael E. Tobar, Peter Wolf, Mohamad Susli, Clayton R. Locke, Eugene N. Ivanov, John Winterflood, et Frank van Kann. « Test of Lorentz Invariance in Electrodynamics Using Rotating Cryogenic Sapphire Microwave Oscillators ». *Physical Review Letters* 95, nº 4 (21 juillet 2005): 040404. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.040404.

Stokes, George Gabriel. *On Fresnel's Theory of the Aberration of Light*. London, 1846.

Strominger, Andrew. « Black Hole Entropy from Near-Horizon Microstates ». *Journal of High Energy Physics* 1998, nº 02 (15 février 1998): 009-009. https://doi.org/10.1088/1126-6708/1998/02/009.

Strominger, Andrew, et Cumrun Vafa. « Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy ». *Physics Letters B* 379, nº 1 (27 juin 1996): 99-104. https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00345-0.

Susskind, Leonard. « Lecture Collection | Topics in String Theory (Winter 2011) ». YouTube, 2011. http://www.youtube.com/playlist?list=PL3E633552E58EB230.

———. *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. Reprint edition. New York: Back Bay Books, 2009.

Szegedi, Péter. « Lakatos On Crucial Experiments And The History Of Interpretations Of Quantum Mechanics ». In *Appraising Lakatos: Mathematics, Methodology and the Man*, édité par G. Kampis, L. : Kvasz, et M. Stöltzner, 1–101. Kluwer Academic Publishers, 2002.

Tegmark, Max, et John Archibald Wheeler. « 100 Years of the Quantum ». *arXiv:quant-ph/0101077*, 17 janvier 2001. http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101077.

Thiemann, Thomas. *Modern Canonical Quantum General Relativity*. 1 edition. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2008.

———. « The Phoenix Project: Master Constraint Programme for Loop Quantum Gravity ». *Classical and Quantum Gravity* 23, nº 7 (7 avril 2006): 2211-47. https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/7/002.

Thorne, Kip S. « Gravitational Waves ». *arXiv:gr-qc/9506086*, 30 juin 1995. http://arxiv.org/abs/gr-qc/9506086.

Thorne, Kip S., Richard H. Price, et Douglas A. MacDonald. *Black holes: The membrane paradigm*, 1986. http://adsabs.harvard.edu/abs/1986bhmp.book.....T.

Tipler, Paul A., et Ralph Llewellyn. *Modern Physics*. Sixth edition. New York: W. H. Freeman, 2012.

Tong, David. *String Theory*. University of Cambridge, 2009. http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf.

Townsend, P. K. « Four Lectures on M-theory ». *arXiv:hep-th/9612121*, 11 décembre 1996. http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121.

Trenkel, Christian, Steve Kemble, Neil Bevis, et Joao Magueijo. « Testing MOND/TEVES with LISA Pathfinder ». *arXiv:1001.1303 [astro-ph]*, 8 janvier 2010. http://arxiv.org/abs/1001.1303.

Van Patten, R. A., et C. W. F. Everitt. « Possible Experiment with Two Counter-Orbiting Drag-Free Satellites to Obtain a New Test of Einstein's General Theory of Relativity and Improved Measurements in Geodesy ». *Physical Review Letters* 36, nº 12 (22 mars 1976): 629-32. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.629.

Varignon, Pierre (1654-1722) Auteur du texte. *Nouvelles Conjectures Sur La Pesanteur , Par M. Varignon,...*, 1690. https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k74179x.

Verhagen, Paul. « Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory ». Amsterdam University College, 2015. http://www.uva.nl/binaries/content/documents/personalpages/h/a/s.deharo/en/tab-three/tab-three/cpitem%5B8%5D/asset.

Vessot, R. F. C., M. W. Levine, E. M. Mattison, E. L. Blomberg, T. E. Hoffman, G. U. Nystrom, B. F. Farrel, et al. « Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser ». *Physical Review Letters* 45, nº 26 (29 décembre 1980): 2081-84. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.2081.

Visser, Matt. « Acoustic black holes ». *arXiv:gr-qc/9901047*, 15 janvier 1999. http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901047.

Vistarini, Tiziana. « Emergent Spacetime in String Theory », 2013, 103.

Volovik, G. E. « Field theory in superfluid 3He: What are the lessons for particle physics, gravity and high-temperature superconductivity? » *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96, nº 11 (25 mai 1999): 6042-47. https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.6042.

Von Neumann, John. *Mathematische grundlagen der quantenmechanik,*. Berlin: J. Springer, 1932.

Wald, Robert M. « The Thermodynamics of Black Holes ». *Living Reviews in Relativity* 4, nº 1 (9 juillet 2001): 6. https://doi.org/10.12942/lrr-2001-6.

Wallin, John F., David S. Dixon, et Gary L. Page. « Testing Gravity in the Outer Solar System: Results from Trans-Neptunian Objects ». *The Astrophysical Journal* 666, nº 2 (10 septembre 2007): 1296-1302. https://doi.org/10.1086/520528.

Walsh, D., R. F. Carswell, et R. J. Weymann. « 0957 + 561 A, B: Twin Quasistellar Objects or Gravitational Lens? » *Nature* 279, nº 5712 (mai 1979): 381. https://doi.org/10.1038/279381a0.

Walter, Scott. « Breaking in the 4-Vectors: The Four-Dimensional Movement in Gravitation, 1905–1910 ». In *The Genesis of General Relativity*, édité par Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, et John Stachel, 1118-78. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_18.

Wambsganss, Joachim. « Gravitational Lensing in Astronomy ». *Living Reviews in Relativity* 1, nº 1 (2 novembre 1998): 12. https://doi.org/10.12942/lrr-1998-12.

Weinberg, Steven. *Dreams Of A Final Theory: The Search for The Fundamental Laws of Nature*. Random House, 2010.

———. « The cosmological constant problem ». *Reviews of Modern Physics* 61, nº 1 (1 janvier 1989): 1-23. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.1.

———. *The Quantum Theory of Fields, Volume 2: Modern Applications*. 1 edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

———. *The Quantum Theory of Fields, Volume 3: Supersymmetry*. 1st Edition edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

———. « What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is? » *arXiv:hep-th/9702027*, 3 février 1997. http://arxiv.org/abs/hep-th/9702027.

Weingard, Robert. « A Philosopher Looks at String Theory ». *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1988 (1988): 95–106.

Weinstein, Steven. « Absolute Quantum Mechanics ». Preprint, 2000. http://philsci-archive.pitt.edu/836/.

Weinstein, Steven, et Dean Rickles. « Quantum Gravity ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018. https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/quantum-gravity/.

Weisberg, Joel M., David J. Nice, et Joseph H. Taylor. « Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16 ». *The Astrophysical Journal* 722, nº 2 (20 octobre 2010): 1030-34. https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1030.

Weyl, Hermann, Axel Hildebrand, et Dieter Schmalstieg. *Raum. Zeit. Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie*. 7. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo: Springer, 1988.

Weyl, Hermann, et Frank Wilczek. *Philosophy of Mathematics and Natural Science*. Revised ed. edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2009.

Wheeler, John A. « On the nature of quantum geometrodynamics ». *Annals of Physics* 2, nº 6 (1 décembre 1957): 604-14. https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90050-7.

Whitehead, Alfred North. *The Principle Of Relativity With Applications To Physical Science*. Whitefish, Mont.: Kessinger Publishing, LLC, 2008.

Whitrow, G. J., et G. E. Morduch. « Relativistic theories of gravitation : A comparative analysis with particular reference to astronomical tests ». *Vistas in Astronomy* 6 (1965): 1-67. https://doi.org/10.1016/0083-6656(65)90002-4.

Whittaker, Edmund Taylor. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Harper, 1960.

Wigner, E. P., I. J. Good, A. J. Mayne, J. M. Smith, et Thornton Page. « The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-baked Ideas ». *American Journal of Physics* 32, nº 4 (1 avril 1964): 322-322. https://doi.org/10.1119/1.1970298.

Will, C. M. « The theoretical tools of experimental gravitation », 1, 1974. http://adsabs.harvard.edu/abs/1974exgr.conf....1W.

———. « Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect. » *Astrophys. J. 163: 611-28(1 Feb 1971).*, 1 janvier 1971. https://doi.org/10.1086/150804.

———. « Twilight time for the fifth force? », 1990. http://connection.ebscohost.com/c/articles/9011192203/twilight-time-fifth-force.

Will, Clifford. *The Renaissance of General Relativity, in The New Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

Will, Clifford M. « Is momentum conserved? A test in the binary system PSR 1913 + 16 ». *The Astrophysical Journal Letters* 393 (1 juillet 1992): L59-61. https://doi.org/10.1086/186451.

———. « The Confrontation between General Relativity and Experiment ». *Living Reviews in Relativity* 17, nº 1 (décembre 2014): 4. https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4.

———. *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*. Revised edition. Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993.

———. *Was Einstein Right?: Putting General Relativity To The Test*. 2 edition. New York, NY: Basic Books, 1993.

Williams, James G., Slava G. Turyshev, et Dale H. Boggs. « Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity ». *Physical Review Letters* 93, nº 26 (29 décembre 2004): 261101. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.261101.

Winsberg, Eric. *Science in the Age of Computer Simulation*. Chicago: University of Chicago Press, 2010.

Woit, Peter. *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*. Reprint edition. Basic Books, 2007.

Wright, E. L. « What is the evidence for the Big Bang?, in Frequently Asked Questions in Cosmology », 2009. http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#BBevidence.

Wuthrich, Christian. « In Search of Lost Spacetime: Philosophical Issues Arising in Quantum Gravity », 2011.

———. « To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity ». Published Article or Volume. Philosophy of Science, 2005. http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946.

Yau, Shing-Tung. *The Shape of Inner Space*. Reprint edition. Basic Books, 2012.

Yilmaz, Hüseyin. « New approach to relativity and gravitation ». *Annals of Physics* 81, nº 1 (1 novembre 1973): 179-200. https://doi.org/10.1016/0003-4916(73)90485-5.

Zahar, Elie. « Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II) ». *British Journal for the Philosophy of Science* 24, nº 3 (1973): 223–262.

Zandvoort, H., Paul Weingartner, et Methology and Philosophy of Science International Congress of Logic. *Intrinsic Success and Extrinsic Success of Research Programs, in 7th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science: Salzburg, July 11th-16th, 1983 Vol. 4, Vol. 4,*. Salzburg: Huttegger, 1983.

Zee, A. *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*. 2 edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010.

Zenneck, J. « Gravitation ». In *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen: Fünfter Band in Drei Teilen Physik*, édité par A. Sommerfeld, 25-67. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1903. https://doi.org/10.1007/978-3-663-16016-8_2.

Zinkernagel, Henrik. « The Philosophy Behind Quantum Gravity ». *Theoria : An International Journal for Theory, History and Fundations of Science* 21, nº 3 (2010): 295–312.

Zwiebach, Barton. *A First Course in String Theory*. 2 edition. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2009.

Zyga, Lisa. « Gravitational Waves May Oscillate, Just like Neutrinos », 2017. https://phys.org/news/2017-09-gravitational-oscillate-neutrinos.html.